



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

Trabajo de final de grado:

**Estudio experimental de la adherencia de mallas de fibras
vegetales en compuestos Fabric Reinforced Cementitious Matrix**

Autor:

Enrique Hurtán Díaz

Director:

Ernest Bernat Masó

Proyecto presentado para obtener el grado de ingeniería mecánica por la Universidad
Politécnica de Cataluña

Terrassa, Junio del 2019



Gracias a Ernest Bernat y a Luis Mercedes por la atención y ayuda prestada.

A Gerard, Mario, Virginia y Borja por su ayuda con el laboratorio.

Dedicado a mi familia y amigos que siempre han estado apoyando.



Índice de contenido

1. Resumen.....	8
2. Introducción.....	9
2.1. Objetivos.....	9
2.2. Estado del arte.....	10
3. Desarrollo de la experimentación.....	15
3.1. Riesgos y medidas.....	15
3.2. Materiales.....	15
3.3. Mallas.....	20
3.4. Moldes.....	22
3.5. Probetas.....	24
4. Método.....	32
4.1. Ensayo	32
4.2. Variables a ensayar.....	33
4.3. Instrumentación.....	33
4.4. Diseño y montaje.....	34
5. Resultados y Discusión.....	37
5.1. Cálculos.....	37
5.2. Resultados y discusión.....	43
6. Conclusiones.....	50
7. Análisis de seguridad y salud.....	51
8. Impacto ambiental.....	52
9. Bibliografía.....	54

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Imagen del FRCM 8.....	10
Ilustración 2 One shear bond test 9.....	12
Ilustración 3: Doble shear bond test 10.....	12
Ilustración 4: Doble shear bond test 2 11.....	13
Ilustración 5: Tipos de fallos 12.....	13
Ilustración 6: Gráfico esperado según tipo de rotura 12.....	14
Ilustración 7: Fibras vegetales.....	16
Ilustración 8: Resina parte A.....	16
Ilustración 9: Resina parte B.....	16
Ilustración 10: Mortero Sika.....	18
Ilustración 11: Adhesivo y boquilla.....	19
Ilustración 12: Fibras vegetales.....	20
Ilustración 13: Telar.....	20
Ilustración 14: Patrón de trenzado3.....	20
Ilustración 15: Telar mallado con sisal y lino.....	21
Ilustración 16: Resina y báscula.....	21
Ilustración 17: Malla de sisal.....	22
Ilustración 18: Malla de algodón.....	22
Ilustración 19: Malla de cáñamo.....	22
Ilustración 20: Malla de lino.....	22
Ilustración 21: Base del molde.....	22
Ilustración 22: Construcción molde.....	23
Ilustración 23: Molde y cinta.....	23
Ilustración 24: Molde finalizado.....	24
Ilustración 25: Separadores: 5, 10 y 15cm.....	24
Ilustración 26: Vaselina.....	24
Ilustración 27: Mortero Sika.....	24
Ilustración 28: Medir mortero.....	25
Ilustración 29: Preparación mortero.....	25
Ilustración 30: Mezcla de mortero.....	25
Ilustración 31: Preparación probeta.....	26
Ilustración 32: Moldes reposando.....	26
Ilustración 33: Desmontar probetas.....	27
Ilustración 34: Probetas sacadas del molde.....	27
Ilustración 35: Limar probetas.....	28
Ilustración 36: Pletinas.....	28
Ilustración 37: Tabla de pegado.....	29
Ilustración 38: Adhesivo.....	29
Ilustración 39: Pistola de adhesivo.....	29
Ilustración 40: Pegado de pletinas.....	30
Ilustración 41: Probetas finalizadas.....	30
Ilustración 42: Probetas SC5.....	32
Ilustración 43: Probetas SS10.....	32

Ilustración 44: Probetas SH15.....	32
Ilustración 45: Inicio software.....	34
Ilustración 46: Software después de ensayar.....	34
Ilustración 47: Pasadores e imanes.....	35
Ilustración 48: Placa posicionadora.....	35
Ilustración 49: Nivel.....	36
Ilustración 50: Entalla.....	36
Ilustración 51: Montaje finalizado.....	36
Ilustración 52: Formula de tensión16.....	37
Ilustración 53: Formula de deformación unitaria16.....	38
Ilustración 54: Formula del modulo de Young.....	38
Ilustración 55: Datos iniciales.....	39
Ilustración 56: Datos calculados.....	39
Ilustración 57: Gráfico Tensión Deformación SC5-1.....	39
Ilustración 58: Gráfico Tensión adh - Deformación SC5-1.....	40
Ilustración 59: Puntos de cálculo en el gráfico Tensión Deformación.....	41
Ilustración 60: Gráfico Tensión adherencia - Deformación SC5-1.....	42
Ilustración 61: Gráfico de la tensión máxima.....	44
Ilustración 62: Gráfico del módulo elástico de la malla.....	44
Ilustración 63: Gráfico de la tensión máxima en función de la LA.....	44
Ilustración 64: Gráfico del módulo elástico de la malla en función de la LA.....	45
Ilustración 65: Gráfico de deformación.....	45
Ilustración 66: Gráfico de la deformación en función de la LA.....	46
Ilustración 67: Gráfico del módulo elástico del mortero.....	46
Ilustración 68: Gráfico de tensión de adherencia.....	47
Ilustración 69: Rotura SH5-1.....	48
Ilustración 70: Rotura SF5-3.....	48
Ilustración 71: Rotura SC5.....	48
Ilustración 72: Rotura SS5.....	49

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades hilos 3.....	16
Tabla 2: Propiedades de la resina 13.....	17
Tabla 3: Propiedades malla + resina epoxy 3.....	17
Tabla 4: Propiedades del mortero14.....	18
Tabla 5: Propiedades adhesivo15.....	19
Tabla 6: Probetas fabricadas.....	31
Tabla 7: Resultados del ejemplo.....	42
Tabla 8: Tabla de resultados (medias).....	43
Tabla 9: Tipos de rotura.....	47

1. Resumen

El FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), también conocido como TRM (Textile-Reinforced Matrix) es un compuesto muy prometedor para ser utilizado en refuerzo de estructuras antiguas o dañadas por el paso del tiempo. Su composición lo hace totalmente compatible con los distintos materiales utilizados en construcción y edificación, así como son los elementos de mampostería antigua, hasta los diferentes tipos de cemento y hormigón.

Este compuesto está formado por una matriz de mortero y un refuerzo en forma de malla, normalmente fibras textiles de origen sintético. Este está siendo utilizado para el refuerzo de estructuras de hormigón armado y mampostería. Este material supone una alternativa muy prometedora a los materiales que antes se utilizaban para ello, dado el amplio abanico de usos que puede tener y a todas las variaciones del mismo, haciendo cambios en la malla o el propio mortero. Uno de estos materiales es el FRP (Fabric-Reinforced Polymer), material del cual se utiliza hace mucho tiempo, y en cual se basarán los primeros estudios de los compuestos FRCM.

Hoy en día, existen una gran variedad de trabajos en los cuales se pretende caracterizar las propiedades, tanto físicas como químicas, de estos materiales. Para ello, se hacen diferentes tipos de experimentos, ensayos y diferentes especímenes a probar, con diferentes tipos de morteros, mallas, e incluso, diferentes formas de fabricación. Habiendo tal cantidad de trabajos sobre el tema, hay muy pocos encarados a la adhesión interna de los compuestos, la gran mayoría de ellos, están centrados en la adherencia del mortero y el compuesto de obra sobre el que el FRCM se va a adherir (adherencia externa).

De por sí, no existe una gran extensión sobre el FRCM a partir de mallas vegetales, lo que hace más difícil aun la búsqueda de información, por lo que se tiene como base los estudios existentes con el FRCM de mallas sintéticas.

En este trabajo, se pretende estudiar la adherencia interna de los elementos que conforman el FRCM compuesto por mallas de origen vegetal. Para ello, se estudiarán diferentes mallas, con diferentes longitudes de anclaje. Para poder realizar el estudio, se ha creado una nueva metodología de ensayo, en la cual se ha eliminado el compuesto de obra, para así poder obtener la adherencia interna.

En el trabajo está explicado todo el procedimiento seguido, desde el trenzado de las mallas, la fabricación de probetas y la adecuación de las mismas para poder ensayarlas. También, se ha explicado todo lo relacionado con la metodología de ensayo seguida.

Después de ensayar las probetas y de gestionar todos los datos, se han obtenido todos los resultados, y se pueden ver cosas como que las mallas de algodón tienen una mayor deformación que el resto, o que las mallas de sisal fallan de tal manera que no se rompe el hilo.

Como conclusiones se han obtenido que las mallas de lino y cáñamo son las que mayor tensión aguantan, las de algodón tienen tanto desplazamiento debido a su bajo módulo elástico, y que la tensión de adherencia depende en gran parte de la longitud de anclaje de la probeta.

2.Introducción

Uno de los materiales más utilizados en construcción es el hormigón armado, esto ha hecho que se investigue y se estudie mucho. Este material compuesto por una matriz de hormigón y acero, el cual presenta las buenas propiedades a compresión por el uso del hormigón y las propiedades del acero a tracción y flexión, ha hecho que este sea de uso cotidiano en la construcción por ser muy fuerte y duradero.

Hoy en día, se está investigando en el uso de componentes semejantes con el objetivo siempre de reducir el impacto medioambiental que hormigón armado supone. También, se están investigando diferentes vías, con diferentes tipos de materiales, para el uso como refuerzo en estructuras, ya sea por daños leves o como refuerzo en estructuras debilitadas, ya sea por el paso del tiempo o el uso. Uno de los requerimientos de estas investigaciones es que sean soluciones de tamaño reducido, para evitar así la invasión del espacio existente del edificio.

Una de las vías de investigación más reciente consiste en el uso de fibras embebidas en una matriz de mortero como refuerzo estructural. Se está empezando a comercializar con unos pocos tipos de fibras, pero, hay un campo dentro de esa investigación que, aun hoy en día sigue en desarrollo. Este sugiere el uso de fibras de tipo vegetal como refuerzo interno del mortero, lo que reduciría aun más el impacto ambiental en comparación con las fibras sintéticas.

Por estos motivos es por los que la investigación de este trabajo se va a centrar en el estudio de la adhesión de mallas de algodón, cáñamo, lino y sisal, cubiertas en resina, variando la longitud de anclaje sobre una matriz de mortero, formando así un material denominado FRCM (Fabric Reinforced Cementitious-Matrix), ampliando así trabajos anteriores.

2.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la adherencia entre la matriz de mortero y las fibras vegetales, teniendo en cuenta los diferentes materiales de los que se han realizado las mallas.

En este trabajo se determinará la longitud de anclaje (no es más que la zona de los extremos de la probeta, la cual tiene una zona intermedia sin mortero, solo con malla libre) crítica para la correcta adhesión y funcionamiento de los elementos que componen el FRCM. Para ello, se fabricarán un seguido de probetas de mortero, reforzadas de algodón, lino, cáñamo o sisal, en las cuales se variará la longitud anteriormente nombrada para determinar la adhesión de la fibra con resina al mortero. También se pretende determinar en qué material de fibra vegetal utilizado, es más efectivo este proceso.

En los resultados esperamos obtener una relación inversa entre la longitud de anclaje y la fuerza de adhesión, dado que, a mayor longitud de anclaje, menor será el área efectiva de contacto existente entre la malla y el mortero, y viceversa.

También se pretende definir una campaña experimental analizando las diferentes variables a estudiar, los diferentes métodos de ensayo y las diferentes configuraciones que puede llegar a tener la probeta para que nos dé unos resultados más realistas y así poder realizar un análisis de resultados crítico y obtener conclusiones con aplicabilidad técnica.

Este estudio es una continuación de los trabajos realizados por Daniel de la Fuente¹, Albert Rosell² y un artículo publicado por Luis Mercedes³, trabajos llevados a cabo en el laboratorio de estructuras de la UPC de Terrassa.

2.2. Estado del arte

En este apartado se explicará y se recogerá antecedentes históricos sobre la utilización de este tipo de materiales que vamos a estudiar, así como, se recogerán diferentes trabajos realizados sobre la caracterización de su comportamiento.

El FRCM es un material compuesto creado a partir de la combinación de una matriz cementítica (mortero) y un refuerzo basado en fibras de tejidos (orgánicos o sintéticos) o incluso mallas metálicas. La combinación de estos materiales crea un material de naturaleza inorgánica que nos aporta múltiples ventajas con respecto a los materiales base sin combinar y una amplia variedad de propiedades que sería más difícil de conseguir de otra manera.

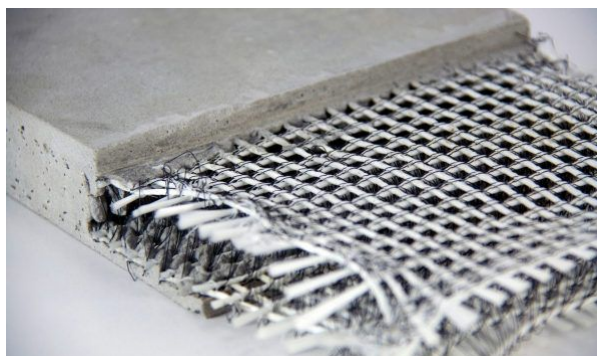


Ilustración 1: Imagen del FRCM ⁸

Este compuesto está basado en el hormigón armado, un elemento de construcción que se ha convertido en uno de los más importantes dado su uso tan generalizado y global. En este caso, el hormigón armado consiste en una matriz que combina cemento, áridos y agua, y como refuerzo se le introducen en su interior unas varillas o una armadura de acero. Esto hace que las propiedades de este material sean muy buenas en cuanto al ámbito de la construcción, y es por eso que es uno de los compuestos más usados hoy día. Sin embargo el **FRCM** está enfocado para ser una **material de refuerzo estructural** y no como base de construcción.

El FRCM es relativamente nuevo, dado que los primeros estudios de ello datan de la década del 1980, y no es hasta hace unos pocos años, cuando esta tipología de materiales se ha empezado a normalizar. En 2013 aparece el primer documento que trata de recoger una normativa con los diferentes tipos de ensayos y metodologías a seguir sobre el FRCM, hasta entonces, se hacían los experimentos adaptando la formulación encontrada en los códigos de diseño de refuerzos internos de estructuras mediante la adherencia externa de FRP (Fabric Reinforced Polymer)^{4, 5, 6}. Actualmente, ya existe una guía de diseño de refuerzos de estructuras de hormigón y mampostería mediante la adhesión de tejidos a partir de una matriz cementítica⁷.

Este tipo de materiales contienen una amplia variedad de propiedades, es por eso que hoy en día se siguen estudiando. Una de las propiedades principales es su mejorada resistencia mecánica, pues es esta propiedad la que hace que sean tan usados. También, gracias a que el refuerzo utilizado es una malla, es resistente a los alcalinos, es resistente al fuego, y dada la flexibilidad de algunas mallas, se puede utilizar en geometrías complejas.

Todas estas propiedades hacen que sean componentes muy útiles y que puede que lleguen a ser muy utilizados en el ámbito de refuerzo estructural. Se puede utilizar como refuerzo de edificios históricos o antiguos cuyos pilares, columnas y paredes se han visto degradadas por el paso del tiempo, como refuerzo en edificios dañados por la acción de catástrofes, y dependiendo del tipo de refuerzo interior del mortero, pueden llegar a ser compuestos bastante asequibles.

Este compuesto se caracteriza realizando diferentes tipos de ensayo para poder determinar diferentes propiedades y límites del mismo. En la actualidad existen una gran variedad de trabajos con el fin de determinar esos límites propios del material. Para ello, se definen diferentes tipos de ensayos, de los cuales, unos determinaran la resistencia a tracción, otros la cohesión de los elementos, otros la resistencia a diferentes agentes y climas, y así hasta cubrir las diferentes propiedades.

En trabajos, como por ejemplo, en el trabajo llevado a cabo por Daniel de la Fuente, llamado *“Estudio experimental de las características mecánicas del material compuesto Textile Reinforced-Mortar relacionadas con el tipo de fijación en ensayos a tracción”*, se define que tipología de ensayo es mejor utilizar. Como resultado se obtuvo, que el ensayo de Clevis era el más indicado para ello¹.

En otro trabajo realizado por Albert Rosell, se estudió la influencia de la velocidad de ensayo en los resultados. Se concluyó que se obtienen mejores resultados a mayor velocidad, pero como este es un componente estático, es mejor no evaluarlo a altas velocidades, dado que se puede acabar definiendo mal las características del mismo. Es por eso que la velocidad del ensayo final es de 5mm/min².

En un estudio realizado por Luis Mercedes, Ernest Bernat y Luis Gil, llamado *“Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites”*, **se caracterizó el FRCM reforzado con mallas formadas por fibras de origen vegetal. En este trabajo, también se obtuvo que el recubrimiento de la malla con resina epoxi, mejoraba las características de la unión entre la malla y la matriz de mortero**³.

Todos los estudios anteriormente nombrados, están realizados en el laboratorio de estructuras de la UPC de Terrassa, y este estudio, pretende ser una continuación de los mismos.

Uno de los principales problemas que presenta el FRCM es la correcta cohesión de los elementos que lo componen. Así mismo, la capacidad de transferencia de tensiones entre el elemento estructural (obra de fábrica) y el refuerzo es otro aspecto a tener muy en cuenta en cuanto a la viabilidad de las técnicas utilizadas para el refuerzo de las diferentes estructuras. Los primeros trabajos que comprueban la adherencia entre todos los componentes que conforman el FRCM y la obra de fábrica, han sido realizados por Ortlepp et al.^{24,25}, en los cuales se detallan las posibles maneras de falla de los conjuntos, y los mecanismos de transmisión de tensiones cuando el refuerzo está parcialmente desenganchado.

Con este trabajo como base, se han realizado otros estudios los cuales emplean diferentes tipos de ensayos para determinar la fuerza de adhesión existente entre las fibras, el mortero y el llamado substrato o obra de fábrica en los compuestos FRCM. Todas ellas necesitan de diferentes mecanismos, medios y especímenes para ensayar. En este apartado se van a explicar diferentes maneras de probar la adhesión en el FRCM y la obra de fábrica.

a) One shear bond test

Este ensayo es uno de los ensayos más utilizados a la hora de ensayar este material para ver su adhesión. Se caracteriza por ser una lamina de la malla pegada a una columna de obra de fábrica, recreando el estado natural donde se va a utilizar esta composición. Para poder ensayar este montaje, se deja un trozo de la malla libre, por encima de la columna, la cual se va a enganchar al puente de la máquina y se va a tensar hasta la rotura.

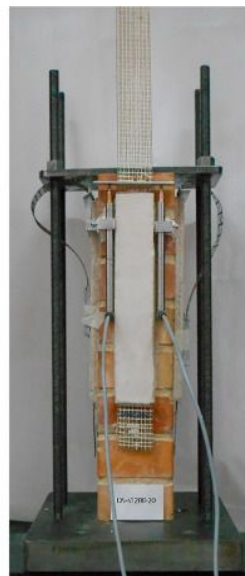
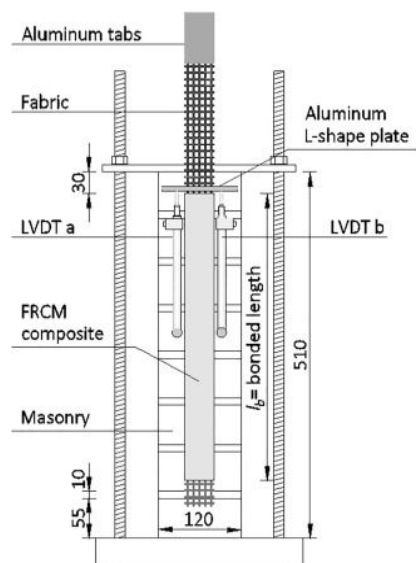


Ilustración 2 One shear bond test ⁹

En el Estudio de Ombres⁹, del cual está sacada la imagen anterior, se concluye que los fallos obtenidos son mediante el despegue del mortero con la superficie de la obra de fabrica. Se indica, que una superficie lo suficientemente grande, produzca un despegue progresivo y que permitirá aguantar lo suficiente como para que este sea útil.

b) Doble shear bond test

Este ensayo se caracteriza por ser semejante al anterior, pero en lugar de tener un solo extremo pegado a un tocho, el otro extremo de la malla, está igualmente pegado por detrás, por lo que para poder tirar de la malla se utilizará un montaje con una polea plana, cuyo únicos requerimientos son que tenga el diámetro igual al ancho de la columna, y tener el montaje bien centrado. Con estos requerimientos, se evita la creación de fuerzas secundarias, y el posible corte de la malla por contacto con la columna, dos elementos muy desfavorables a la hora de recoger datos del ensayo.

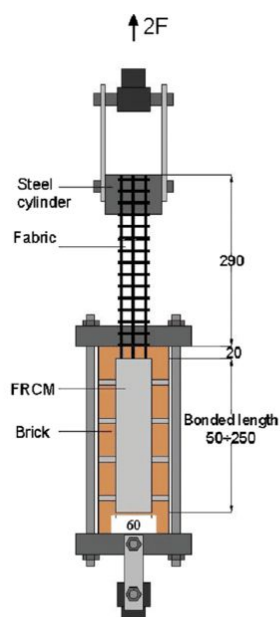


Ilustración 3: Doble shear bond test ¹⁰

Existen variaciones a este ensayo, en las cuales, lo único que cambia es que no se estira con una polea. En otros casos, es un montaje recto, el cual recrea la existencia de una parte central no adherida o una fisura, con los extremos adheridos al sustrato (tochos). En estos tipos de ensayos, se obtendrán los mismos tipos de resultados que en el caso a, dado que si el fallo del ensayo es por rotura de la malla, esta estaría dando la misma carga.

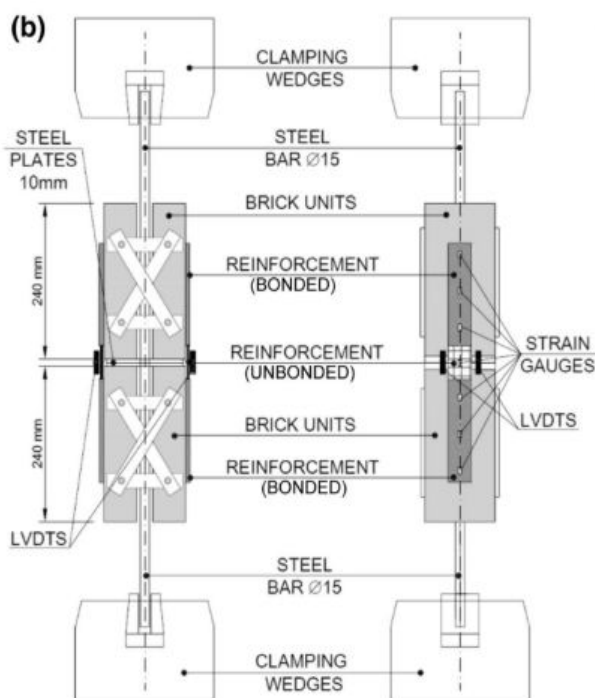


Ilustración 4: Doble shear bond test 2 ¹¹

En los estudios pertenecientes a las dos imágenes anteriores, en los dos casos se han obtenido despegues e incluso, se han obtenido deslizamientos para longitudes de anclaje altas.

Analizando los tipos de rotura que podemos obtener en estas tipologías de ensayos, podemos ver que existen diferentes fallos:

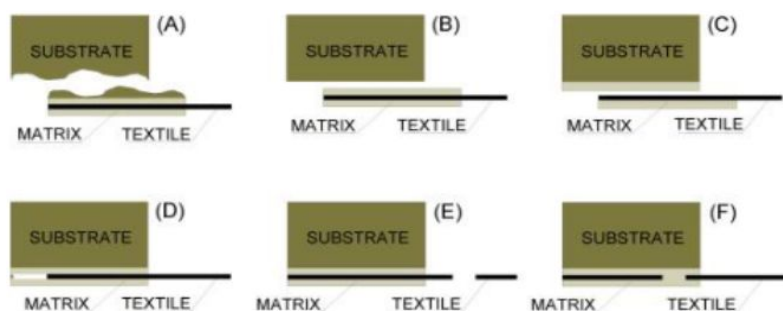


Ilustración 5: Tipos de fallos ¹²

En la anterior imagen tenemos los diferentes tipos de fallos, los cuales son:

A. Rotura del sustrato.

- B. Despegue del mortero con la placa metálica.
- C. Despegue del mortero de la fibra.
- D. Deslizamiento de la fibra por el mortero.
- E. Rotura de la malla.
- F. Rotura de la malla en la zona del mortero más deslizamiento de la misma por la matriz.

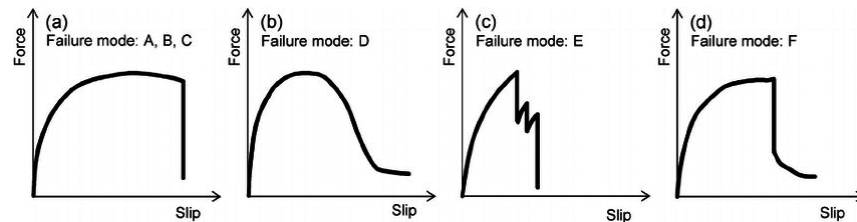


Ilustración 6: Gráfico esperado según tipo de rotura¹²

En la imagen anterior se muestra el tipo de gráfico esperado según el tipo de rotura de la ilustración anterior.

A día de hoy, se siguen caracterizando diferentes tipos de mallas, cada vez centrándose mas en mallas de fibras vegetales, con nuevas tipologías de ensayo, realizando cambios en los diferentes componentes que las conforman, para encontrar así, nuevas combinaciones que puedan satisfacer nuevos requerimientos y que puedan ser más asequibles.

3.Desarrollo de la experimentación

En este apartado se expondrán y se desarrollarán todos los pasos realizados para la creación de las probetas de mortero con las mallas de fibras vegetales intercaladas, haciendo mención a las herramientas necesarias para llevar las acciones a cabo, hasta el punto de tener la probeta finalizada para poder realizar el ensayo.

Para ello, se dividirá el proceso en diferentes apartados, explicando primero el como se han creado las mallas, a continuación, como se han fabricado los moldes y probetas y finalmente el proceso de adecuación de la probeta para poder ser ensayada.

3.1. Riesgos y medidas

Siempre se hará uso de los EPI's necesarios para la seguridad y salud de las personas involucradas en el proyecto. De tal manera que cualquier persona presente en el laboratorio tiene que llevar una **bata**, **pantalones largos** y en caso de tener el **cabello largo**, lo ha de llevar **recogido**. Para el correcto seguimiento de seguridad, se han de cumplir las siguientes normas:

Se utilizarán **guantes mecánicos** siempre que se haya de manipular cualquier tipo de herramienta, y siempre que se tenga que transportar algún elemento medianamente pesado y difícil de coger.

Se utilizarán **gafas de protección** para el uso y manipulación de herramientas, y en el caso de que estas, provoquen un sobrante que quede suspendido en el ambiente, se hará uso de las **mascarillas**. También se usaran las gafas en el caso de la manipulación de elementos químicos.

Se utilizarán **mascarillas y guantes químicos** para el uso y manipulación de los diferentes productos químicos que se emplean en el proyecto.

En transportes de peso significativo, se hará uso también de las **botas de seguridad**.

3.2.Materiales

En este apartado se expondrán, uno a uno, los materiales utilizados más importantes usados para el desarrollo y construcción de las probetas.

- **Mallas**

Las mallas están compuestas por dos elementos, un trenzado del hilo que se vaya a utilizar y la resina con la cual vayamos a cubrir, endurecer y asentar los trenzados.

Para ello, se ha utilizado diferentes materiales a trenzar, todos componentes vegetales. Se ha hecho uso de algodón, cáñamo, lino y sisal.

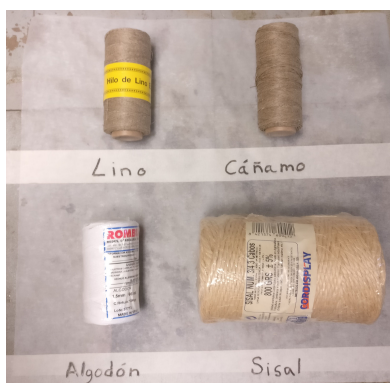


Ilustración 7: Fibras vegetales

Propiedades	Lino	Cáñamo	Esparto	Algodón
Diámetro del hilo	0,5	0,5	2,5	1,5
Numero de hilos	8	8	2	4
Densidad lineal (g/mm)	0,40	0,43	3,63	1,20
Densidad volumétrica (g/cm ³)	2,04	2,17	0,74	0,67
Peso de la malla/area (g/cm ³)	0,034	0,036	0,070	0,054

Tabla 1: Propiedades hilos ³

Estas fibras, han sido tejidas en un telar, y a continuación se han impregnado de resina epoxi con la ayuda de una brocha. La resina utilizada es una resina epoxi de la marca BASF denominada "MasterBrace P 3500". Esta resina viene en dos latas (parte A y parte B) para mezclar y usar sobre la superficie requerida.

Esta es una resina indicada para sistemas compuestos de refuerzo estructural a base de fibra de carbono, aunque nosotros, la vamos a utilizar en mallas de origen vegetal, dado que es la que mejor resultado proporcionó en el estudio que realizó Luis Mercedes, anteriormente llevado a cabo en el laboratorio.



Ilustración 8: Resina parte A



Ilustración 9: Resina parte B

Esta resina tiene un seguido de propiedades las cuales, determinadas por el fabricante, son:

Propiedades	Resina epoxy
Densidad (g/cm ³)	1,05
Tiempo de trabajo (min)	30
Resistencia a tracción (MPa)	22,9 ± 4
Elongación (%)	18,2 ± 7
Resistencia a flexión (MPa)	Sin rotura
Modulo de flexión (MPa)	233,1

Tabla 2: Propiedades de la resina ¹³

Una vez todo el proceso esté realizado, se obtendrán las mallas, las cuales contienen los dos elementos anteriormente descritos. Estas mallas son las que se usarán de refuerzo para el mortero, las cuales una vez fabricadas poseen estas características:

Propiedades	Cáñamo	Lino	Sisal	Cotton
Densidad lineal (g/m)	0,890	0,920	8,140	4,130
Relación longitudinal epoxy/hilo (g/m)	0,500	0,500	4,510	2,930
Relación superficial epoxy/hilo (g/m ²)	0,015	0,016	0,030	0,050
Peso/superficie malla + epoxy (g/cm ²)	0,075	0,077	0,217	0,189

Tabla 3: Propiedades malla + resina epoxy ³

- **Mortero**

Este es un elemento muy importante en la investigación. Este elemento es un compuesto de conglomerados inorgánicos agregados finos y agua que sirve para la unión de los diferentes elementos de construcción. Es por eso que en la actualidad existe una gran variedad de morteros, cada uno, adecuada a un tipo de unión o requerimientos de la infraestructura a construir. Es por eso que se ha de escoger el mejor mortero para cada caso.

En este caso se ha escogido el mortero “Sika MonoTop 612” este mortero es un mortero de reparación estructural, que integra fibras poliméricas en su composición para una mayor resistencia a tracción.

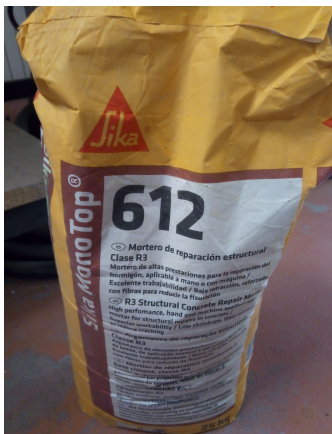


Ilustración 10: Mortero Sika

En la imagen anterior se puede ver el mortero anteriormente descrito, el cual tiene las propiedades que se muestran a continuación:

Propiedades	Monotop-612 sika
Resistencia a tracción	8,3 N/mm ²
Resistencia a compresión	40,3 N/mm ²
Resistencia a cizalla	1,8 N/mm ²
Contenido de fibras de polímeros	8% del pes del cemento
Partículas de áridos	≤ 2 mm
Contenido de cloruros	<0,03%
Espesor de aplicación	5 mm a 30 mm
Temperatura de aplicación	5º a 30º C
Resistencia al fuego	Euroclase A1
Absorción de agua	0,2 kg·m ⁻² ·h ^{-0.5}
Proporción de agua	12,66%
Tiempo de curado	28 dies
Cantidad de mezcla	3,625l de agua por 25kg (12,66%)
Tiempo de vida de la mezcla (20ºC)	30 – 40 min
Coste (saco de 25 kg)	26,95 €

Tabla 4: Propiedades del mortero¹⁴

- **Adhesivo**

El adhesivo lo vamos a utilizar para, una vez creadas las probetas, adecuarlas para los ensayos pegandoles unas placas metálicas en los extremos. Este componente es importante debido a que se necesita un adhesivo que sea lo suficientemente duro para que en el ensayo las placas no se despeguen del mortero.

El adhesivo que se va a usar es el pegar las pletinas a las probetas se llama Epoxi Bicomponent Hysol 3425 de la marca Loctite.



Ilustración 11: Adhesivo y boquilla

Este es un pegamento de alta resistencia cuyas propiedades son:

Propiedades	Hysol 3425
Tecnología	Epoxi
Componentes	Resina y endurecedor
Viscosidad	Tixotrópico
Curado	Tª ambiente
Campo de aplicación	Unió
Aspecto	Pasta beige claro
Resistencia a tracción	27 N/mm ²
Resistencia a compresión	65 N/mm ²
Tiempo de maniobrabilidad	30 minutos
Tiempo de curado	24 horas
Tª transición vidria	72 °C
Dureza	70-80 Shore D

Tabla 5: Propiedades adhesivo¹⁵

3.3. Mallas

Las mallas se han fabricado siguiendo un proceso anteriormente realizado en el laboratorio, desarrollado por Luis Mercedes, el cual lo utilizó para desarrollar su artículo nombrado “Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites”

Para fabricar las mallas es necesario tener bobinas de los hilos que vamos a utilizar en la experimentación. Los materiales de los que se van a fabricar son: algodón, lino, cáñamo y sisal. También haremos uso de un telar.

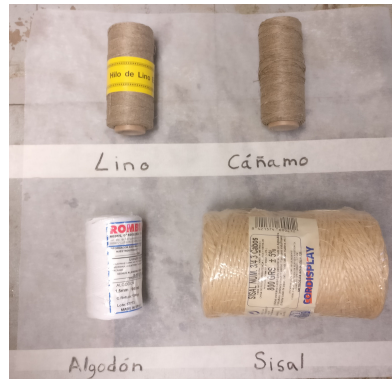


Ilustración 12: Fibras vegetales



Ilustración 13: Telar

Trenzaremos las mallas siguiendo el mismo patrón utilizado en el artículo anteriormente nombrado.

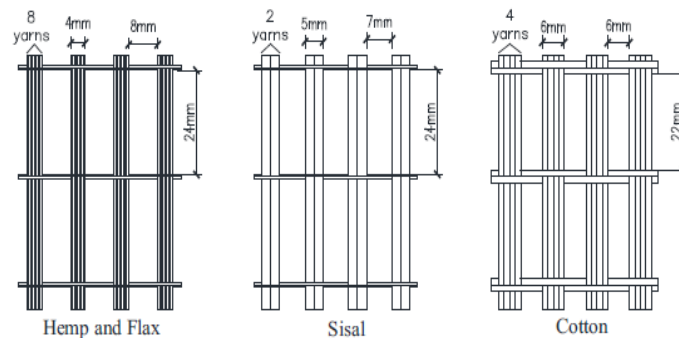


Ilustración 14: Patrón de trenzado³

En esta imagen sobre el patrón de trenzado, se pueden observar diferencias dependiendo del material, esto es así, dado que se intenta compensar los diferentes tamaños de hilo. Añadir también que en la malla de sisal, el componente transversal de la malla es lino, solo las fibras verticales son sisal.



Ilustración 15: Telar mallado con sisal y lino

El siguiente paso a realizar, una vez se ha hecho la malla en el telar, es impregnar la malla de resina. Para ello utilizamos una resina del tipo epoxy, la cual viene en dos partes (A y B) y se ha de medir la mezcla con el balance impuesto por el fabricante, en nuestro caso, es 39 de la parte A y 11 de la parte B. Para cubrir todo el telar, se han mezclado un total de 100g de mezcla, los cuales han sido suficientes para dar un par de pasadas a la malla por delante, tanto como por detrás.



Ilustración 16: Resina y báscula

Una vez cubierta la malla con resina, se deja secar todo durante 1 día. Posteriormente, se procederá a cortar la malla, con unos alicates de corte o unas tijeras de podar y retirar todos los sobrantes, dejándolo limpio para la siguiente malla. El resultado que obtenemos es una malla de 4 hilos verticales semi-rígida.



Ilustración 17: Malla de sisal

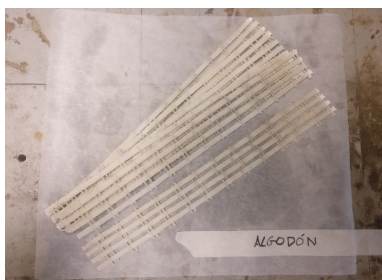


Ilustración 18: Malla de algodón

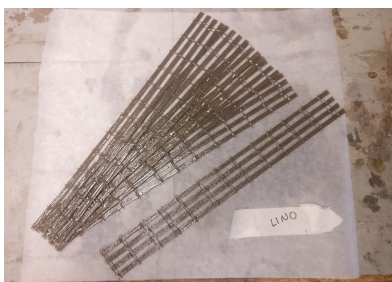


Ilustración 20: Malla de lino

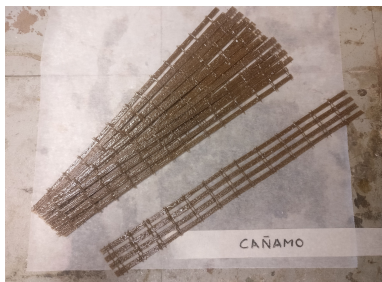


Ilustración 19: Malla de cáñamo

En este punto, las mallas ya están listas para ser utilizadas en los moldes con el mortero.

3.4. Moldes

En este apartado se expondrá el proceso seguido para la creación y adecuación de los moldes para crear las probetas. Estos moldes ya han sido preparados anteriormente en el laboratorio para la realización de otros trabajos semejantes, en los que se estudiaban otros parámetros del mismo tipo de compuestos.

Se empiezan a construir los moldes encontrando y clasificando las maderas ya cortadas con los tamaños requeridos, y se van a limpiar y a encintar con cinta de plástico para que el mortero no se quede pegado. Se van a construir un total de 4 moldes, realizando en cada uno un total de 15 probetas. Esto es así, dado que esta experimentación se está realizando en paralelo con un trabajo semejante, en el que se están utilizando otro tipo de fibras. Los moldes se han de construir del mismo tamaño que las probetas, estas tendrán un tamaño de 400 x 50 x 10 mm (largo-ancho-espesor).



Ilustración 21: Base del molde

Para posicionar los listones de maderas, será necesario clavarlos a la base, asegurando así que no se moverán en ningún momento.



Ilustración 22:
Construcción molde

Para ello, se hace uso de un martillo, clavos, y por si algún listón se tuviera que reposicionar, unos alicates y un destornillador plano.

A continuación, una vez montadas las maderas, se cubrirá la parte donde se alojarán y curarán las probetas con una cinta de plástico, Consiguiendo así que el alojamiento de la probeta sea menos adherente y poder retirar de mejor manera las probetas.



Ilustración 23: Molde y cinta

Una vez cubierto el molde con la cinta, se posicionan los separadores en el centro del espacio para las probetas. Estos separadores son necesarios para dejar el espacio libre de mortero en la probeta y así ensayar el factor de adhesión de la malla al cemento. Anteriormente, se han cortado unos cartones, los cuales se han cubierto de cinta. Se han cortado separadores de tres medidas diferentes: de 5cm, 10cm y 15cm, de los cuales se van a fabricar tres probetas de cada material.



Ilustración 24: Molde finalizado



Ilustración 25: Separadores: 5, 10 y 15cm

Por ultimo, cubriremos el molde con una fina capa de vaselina, haciendo uso de una brocha, con esto conseguimos un desmoldado fácil y con menor riesgo de rotura.



Ilustración 26: Vaselina

3.5. Probetas

Con todos los pasos anteriormente descritos realizados, se empezará a fabricar las probetas. Para ello, será necesario el mortero a utilizar, una báscula para la medida de los componentes, unos recipientes para la manipulación de estos, una mezcladora, y unas rasquetas.



Ilustración 27: Mortero Sika

Empezaremos midiendo las cantidades de mortero a usar. Se han calculado unos 6kg de mortero para rellenar 1 solo molde. Para la mejor manipulación de este y para evadir la posibilidad de que el mortero se seque en el cubo, es recomendable preparar el mortero molde a molde. **En la mezcla, no se ha usado el porcentaje de mortero agua que recomienda el fabricante**, nos hemos basado en un estudio anterior realizado en el laboratorio con el mismo mortero²², y **se ha usado una relación del 16% de agua**.



Ilustración 28: Medir mortero

Una vez medidas las cantidades necesarias y vertido todo en un cubo lo suficientemente grande, se mezclará todo. Primero, con una rasqueta, se mezclará un poco a mano para que el mortero se quede bastante mojado y así, a la hora de meter la mezcladora, no salte polvo al aire. Con la mezcladora, batiremos toda la mezcla durante unos cuantos minutos. Se ha de tener en cuenta que este mortero, una vez mezclado con el agua, se vuelve un fluido tixotrópico, por lo que se ha de mezclar bien para que este tenga la consistencia requerida. Incluso con esta propiedad, si en un corto espacio de tiempo de menos de 10 minutos, parece que el mortero se ha endurecido un poco, se puede volver a mezclar para tener otra vez la viscosidad buscada.



Ilustración 29: Preparación mortero



Ilustración 30: Mezcla de mortero

Con la mezcla obtenida, se rellenará la mitad inferior de los moldes, dejando la parte del separador

sin mortero. Para rellenar la mitad de manera casi exacta y constante, se utilizará una herramienta de chapa plegada con un saliente central del ancho de la probeta que quedará a la mitad de la profundidad del molde.



Ilustración 31: Preparación probeta

El paso siguiente es introducir la malla en el molde, apretándola un poco, poner encima de la malla otro separador de cartón justo encima del de la parte inferior, y finalmente, acabar de rellenar los moldes. Una vez rellenados los moldes, se mirará de que la parte superior de las probetas quede lo mas lisa y libre de faltas y poros, esto se realiza pasando una rasqueta doblada por encima de las probetas.

Finalmente, se guardarán los moldes en un lugar seguro para su curación y se cubrirán con una capa de papel film para evitar que caiga polvo y piedras encima de las probetas.



Ilustración 32: Moldes reposando

Después de **2 semanas de curación en los moldes**, las probetas están listas para ser retiradas. Para ello se hará uso de un destornillador y unos alicates. Lo que se va a realizar es desmontar el molde fila a fila y con cuidado para no romper las probetas.



Ilustración 33: Desmontar probetas

Este paso se vuelve sencillo por la utilización de la cinta adhesiva y la vaselina a la hora de montar el molde. El resultado obtenido es una probeta con dos puntas de mortero y el centro libre. La longitud variable del centro, hace que varíen las puntas, de las cuales depende una de las bases del estudio, ya que son las diferentes longitudes de anclaje a estudiar..



Ilustración 34: Probetas sacadas del molde

Las probetas han de estar 1 mes de reposo desde que se fabrican hasta que se ensayan. Para seguir así con las especificaciones del fabricante del mortero y dejar que se cure bien. Después de las dos semanas en el molde, estas se pueden ir preparando para que estén listas para ensayar al mes de ser fabricadas.

Una vez obtenida la probeta, se procederá a limpiar las caras de posibles impurezas que hayan podido quedarse enganchadas, y a limar/lijar las caras superior e inferior para dejarlas lo mas planas posibles para el siguiente paso.



Ilustración 35: Limar probetas

El siguiente paso consistirá adaptar las probetas para poder ensayarlas, mediante el método de Clevis. Para ello se hará uso de un tablón, el cual contiene separadores y agujeros en los lugares concretos para la correcta sujeción de las probetas mientras estas se adhieren a sus respectivas pletinas.



Ilustración 36: Pletinas

Primero, limpiaremos la superficie de trabajo del tablón, y seguidamente, se pegaran los tornillos a la parte trasera del tablón con un poco de loctite pegamento instantaneo, para evitar así un mal posicionamiento de las probetas. Acto seguido se colocará un papel de cocina envolviendo la zona de trabajo del tablón para evitar así que el adhesivo de las pletinas se pegue al tablón.

Este paso solo se puede realizar con 10 probetas de manera simultanea. Las placas van a estar pegadas una longitud de 10cm desde el extremo de la probeta, y estas, están marcadas y mediante un granallado para mejorar la adherencia entre el pegamento y el metal.



Ilustración 37: Tabla de pegado

Acto seguido, se irá poniendo el adhesivo sobre dos de las placas (una contrapuesta a la otra), para poder ir pegando probetas. Una vez colocada la probeta, se rellenarán dos placas mas con el adhesivo y se colocaran en la parte superior de la probeta para así, dejarla reposar. Se irán haciendo una a una siguiendo el esquema anteriormente explicado.



Ilustración 38: Adhesivo

Para verter el adhesivo sobre las placas, se utilizará una pistola del propio pegamento, a la cual, se le ha de introducir el bote de adhesivo, colocar una boquilla, y posicionar el pistón trasero para a la hora de apretar el gatillo, la cola avance por la boquilla (esta mezcla los dos componentes para que el pegamento salga ya mezclado).



Ilustración 39: Pistola de adhesivo

Una vez tengamos una probeta con las placas pegadas, se posicionarán unos pesos en la parte superior para que el pegamento asiente sobre la probeta y desborde el pegamento sobrante.

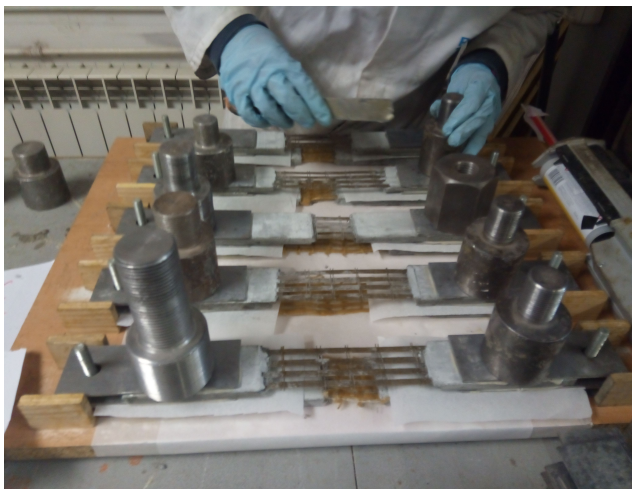


Ilustración 40: Pegado de pletinas

Con este procedimiento se rellenarán 2 pisos de 5 probetas cada uno. Para evitar que se queden pegadas las probetas, se cortará en papel de cocina, unos separadores para aislar la primera de la segunda fila de probetas. Se realizará lo mismo con los pesos. **Se ha de vigilar que las probetas queden rectas, tensas y que los agujeros superiores de las pletinas queden centrados con los tornillos.** En caso de que la probeta deslice, se irá recolocando cada 4-5 minutos hasta que el pegamento esté lo suficientemente seco como para aguantar los pesos sin deslizar (siempre se dejará el peso encima de la probeta, aunque deslice).

Finalmente, y después de haber dejado **reposar el adhesivo durante 1 día a temperatura ambiente**, se procederá a retirar las probetas de la tabla con cuidado. Las probetas van a reposar mínimo 1 día mas y ya estarán listas para ensayar.

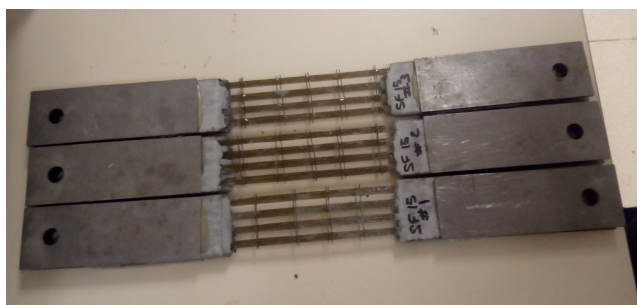


Ilustración 41: Probetas finalizadas

Para distinguir las diferentes probetas, estas se van a marcar siguiendo un patrón del tipo **AB XX # Z**

- **A:** Indica el tipo de mortero, en nuestro caso, en todas será una S, ya que proviene de la inicial del mortero utilizado (Sika).
- **B:** Indica el tipo de malla utilizada con su inicial en ingles, en nuestro caso tendremos las variaciones: C – algodón (cotton), H – cáñamo (hemp), F – lino (flex) y S – sisal.
- **XX:** Indica la separación central, en nuestro caso 5 cm, 10 cm o 15 cm. Esta separación condiciona las puntas (longitudes de anclaje) las cuales pueden ser de 175 mm, 150 mm o 125 mm respectivamente
- **Z:** El número de espécimen con esa configuración, en nuestro caso 1, 2 o 3.

A continuación hay una lista con todas las probetas creadas para el estudio:

SH5-1	SC5-1	SF5-1	SS5-1
SH5-2	SC5-2	SF5-2	SS5-2
SH5-3	SC5-3	SF5-3	SS5-3
SH10-1	SC10-1	SF10-1	SS10-1
SH10-2	SC10-2	SF10-2	SS10-2
SH10-3	SC10-3	SF10-3	SS10-3
SH15-1	SC15-1	SF15-1	SS15-1
SH15-2	SC15-2	SF15-2	SS15-2
SH15-3	SC15-3	SF15-3	SS15-3

Tabla 6: Probetas fabricadas

Como podemos ver hay tres probetas fabricadas por cada longitud de anclaje con cada malla.

Una vez ensayadas las probetas, se ha de limpiar las pletinas, dado que no hay suficientes para poder pegar todas las probetas. Para ello, se intentarán separar las pletinas de las probetas haciendo presión por el lado libre, y una vez separadas, se apilarán en un recipiente lo suficientemente alto como para poder cubrir las placas con disolvente universal. Después de 1 día a remojo en el disolvente, el adhesivo debería salir de manera fácil, si no lo hace, retirar todo el mortero que sea posible de la pletina y volver a dejar en remojo. Para limpiarlas, se utilizará una rasqueta, con la que se retirará todo el adhesivo de la pletina. Una vez limpias, se secan con un papel para quitar el disolvente que haya quedado en las placas y poder volver a utilizarlas.

4. Método

En este apartado se pretende describir la metodología seguida para estudiar la adherencia entre los componentes que conforman el FRCM, es decir, entre el mortero y las diferentes fibras utilizadas. Para ello, hemos fabricado unas probetas y ahora, se definirá la metodología de ensayo. Primero, se ha de conocer las variables que se han de ensayar y explicar los casos que nos podemos llegar a encontrar. Por ultimo, se ha de saber que de que herramientas se disponen para poder realizar dicho ensayo y como se va a adaptar todo.

4.1. Ensayo

El ensayo que se va a utilizar para caracterizar las probetas realizadas, será una mezcla de metodologías. Se empleará como base el ensayo de Clevis, empleado en probetas enteras para definir la resistencia ultima a tracción del conjunto, pero en nuestro caso, con una probeta dividida en dos partes y unida por la malla, que quedará entremedio de los dos extremos adheridos.

Este ensayo se realiza de este modo dado que es un ensayo en el que se evitan los posibles fallos entre el FRCM y el componente de obra de los ensayos explicados en el estado del arte. También es el que por morfología, montaje y material disponible, era más sencillo de realizar en el laboratorio, y por lo tanto, lo hace más económico.

En este ensayo se emplearán este tipo de probetas, las cuales, como anteriormente se ha dicho, tienen una parte interior libre de mortero, y en los extremos, tienen pegadas un total de 4 placas (2 por lado), imitando el método de Clevis. Las probetas, se posicionarán en la máquina de ensayo, de igual manera como si de un ensayo de Clevis se tratara.



Ilustración 42: Probetas SC5



Ilustración 43: Probetas SS10



Ilustración 44: Probetas SH15

Uno de los principales cambios de este ensayo con respecto a los anteriores explicados en el estado del arte, es que se elimina la adhesión externa del mortero con los tochos. Esto es así dado que los hemos cambiado por placas. Lo que este cambio nos permite obtener en cuanto a resultados, es directamente, la adhesión interna de los componentes, sin tener en cuenta la interacción del mortero con el tocho.

Analizando los tipos de roturas que podemos obtener en este caso, obtenemos los mismos tipos de fallos que en los ensayos expuestos en el estado del arte (ilustraciones 5 y 6, pagina 13 y 14).

Podemos añadir que en nuestro caso, podemos tener un tipo de rotura más, que es que se rompa el mortero, su representación sería como el caso A, pero, en lugar de ser sustrato, sería mortero.

4.2. Variables a ensayar

La propiedad que se va a caracterizar con estos ensayos realizados, va a ser la adherencia interna de las dos partes del compuesto de FRCM. Esta variable se va a caracterizar según el tipo de malla de refuerzo utilizada, y según la longitud de anclaje de la malla al mortero.

En cuanto a tipo de malla, se han utilizado 4 mallas de diferentes compuestos (algodón, cáñamo, lino y sisal). Esto nos permitirá ver las diferencias existentes entre las propiedades de cada tipo de hilo, y el comportamiento de cada uno de estos dentro de la matriz de mortero.

Para variar la longitud de anclaje, se ha dejado en el centro de la probeta, un trozo de la malla sin recubrimiento de mortero, y variando la longitud central de la probeta, se consigue hacer variar la longitud de malla inmersa en el mortero. Estas longitudes intermedias varían entre 50 mm, 100 mm y 150 mm, lo que hace que en las longitudes de anclaje, se tengan variaciones de 175mm, 150mm y 125 mm, respectivamente. Anteriormente se ha introducido una tabla con el nombre de todos los especímenes creados para el estudio (tabla 6, pagina 31), en total, 36 probetas.

4.3. Instrumentación

La instrumentación es una de las partes más importantes para cualquier proyecto, pues esta puede tener ciertas limitaciones o puede dar pie a diferentes tipos de ensayos. En nuestro caso se dispone de una *MTS Insight 10kN*. Esta prensa, de accionamiento electromecánico, es una máquina pequeña, con bastante versatilidad que nos va permitir realizar una buena toma de datos. Dispone de varios cabezales y de un software y control manual sencillos.

Con esta máquina, también se va a usar un extensómetro, el cual está conectado a la prensa para que la toma de datos de elongación sea certera.

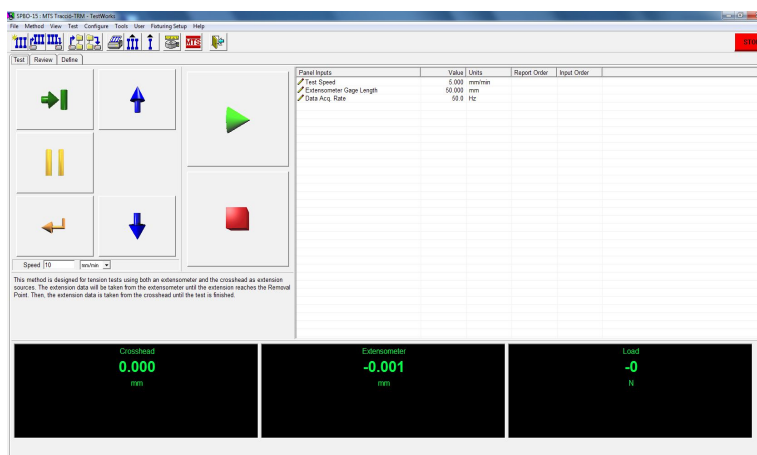


Ilustración 45: Inicio software

Una vez realizado el ensayo, tenemos la posibilidad de guardar en el mismo documento otros ensayos, esto se va a aprovechar para guardar cada tipología de probeta. La interfaz del software después de ensayar, también es lo suficientemente limpia y sencilla para realizarlo, y además, muestra información relevante que para los cálculos vamos a necesitar.

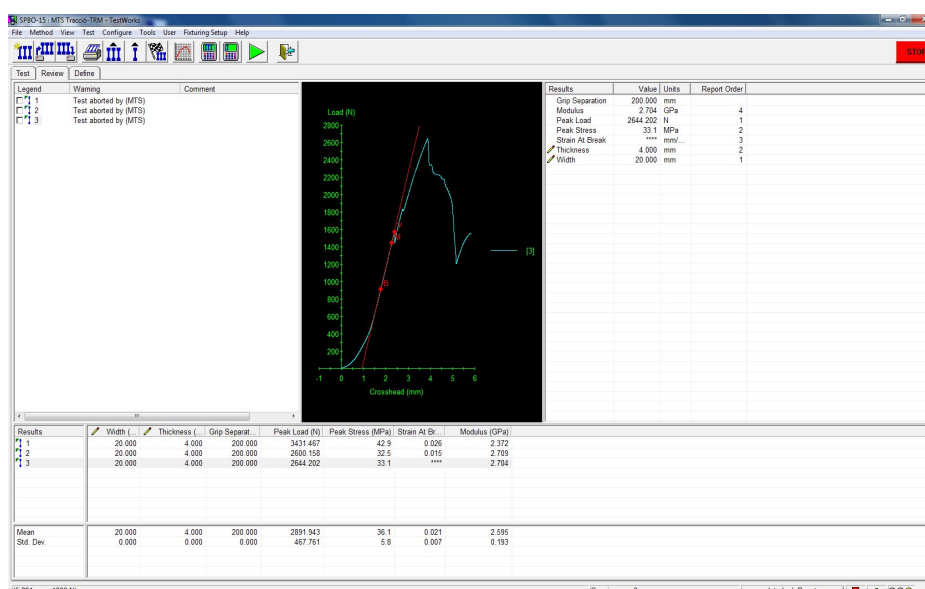


Ilustración 46: Software después de ensayar

4.4. Diseño y montaje

En este apartado se va a explicar todo el procedimiento seguido para el montaje de la probeta en la máquina de ensayos para poder obtener los resultados de manera correcta.

Como se ha visto en apartados anteriores, se caracterizará mediante el ensayo de Clevis, el cual se caracteriza por conectar el espécimen a la máquina mediante unos mosquetes y unos pasadores, para así, poder dejar la probeta en estado libre, sin presiones añadidas.

Se comenzará posicionando la máquina de ensayo a una altura cercana a la posición de los pasadores y se introducirá primero el pasador superior. Acto seguido se dejará la probeta libre y se

posicionara el pasador inferior.



Ilustración 47: Pasadores e imanes



Ilustración 48: Placa posicionadora

A continuación, posicionaremos dos imanes de neodimio de $\varnothing=20\text{mm}$ en el extremo interior de la pletina, centrados en lo ancho de la probeta. Estos se utilizarán para posicionar unas placas en forma de L, las cuales se comprobarán que estén orientadas de manera vertical con un nivel (colocar las placas de tal manera que las ranuras queden juntas en el centro de la probeta).

Importante: Medir la distancia interior entre las dos pletinas con la probeta colgada en la máquina. Esta distancia se requiere en los cálculos, los cuales serán más correctos con estas distancias medidas.

Estas placas sirven para posicionar de manera correcta el extensometro, el cual lo colocaremos a continuación y lo posicionaremos en unas muescas que tienen las placas en forma de L, estas servirán de ayuda para que el extensometro no se mueva.



Ilustración 49: Nivel



Ilustración 50: Entalla

Una vez todo colocado de manera correcta, **se pretensará la probeta a una fuerza de 5N**, lo cual sirve para el correcto posicionamiento de la probeta en la máquina y para que las fibras se alineen.



Ilustración 51: Montaje finalizado

Para facilitar después el procesamiento de datos, y por si acaso no se hubiese guardado bien algún documento, se rellenará una tabla a medida que se van realizando los ensayos la cual contendrá como campos los siguientes puntos (esta tabla está disponible en el *Anexo*):

Muestra	Carga máxima	Tipo de fallo	L_0	Observaciones
---------	--------------	---------------	-------	---------------

5. Resultados y Discusión

En este apartado se explicarán todos los cálculos a realizar para la obtención de los resultados. También, se mostrarán tablas de resultados y gráficos comparativos para facilitar la comparación de los diferentes resultados obtenidos en los diferentes casos y en las diferentes variables. Todo el seguido de cálculos está disponible en el *Anexo*.

5.1. Cálculos

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se empezará a realizar la gestión de los datos. Para ello, se ha de saber que datos vamos a necesitar, y cuales son los resultados a obtener.

Directamente de la máquina de ensayos, se obtendrá un documento del tipo *.txt* con tres columnas, las cuales corresponden a la fuerza medida por el captador de la máquina, al desplazamiento del puente de la misma y al desplazamiento medido por el extensómetro, respectivamente. También, hemos de tener medida la distancia entre pletinas de las probetas, tal y como se indica en el apartado anterior.

De todas las probetas se van a obtener los siguientes factores:

- **Tensión de fisuración:** Tensión a la que se produce la primera fisura del mortero. Para el cálculo, se utilizará el área del mortero normal a la dirección de la fuerza aplicada.
- **Tensión máxima:** Tensión máxima soportada por la probeta. Para el cálculo, se utilizará el área formada por la sección de los hilos en la dirección normal de la fuerza.
- **Deformación ultima:** Deformación máxima a la cual la probeta rompe.
- **E mortero:** Modulo calculado en una zona lineal y de pendiente positivo antes de la primera fisura.
- **E malla:** Modulo calculado en una zona lineal y de pendiente positivo antes de la tensión máxima (rotura) del espécimen.
- **Tensión máxima de adherencia:** Tensión tangencial máxima soportada por el espécimen. Para el cálculo, se utilizará el área de contacto del mortero con las fibras.

FORMULA DE LA TENSION

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0}$$

$$\sigma_e = \text{Tensión}$$

$$F = \text{Fuerza Aplicada}$$

$$A_0 = \text{Sección Inicial}$$

Ilustración 52: Formula de tensión¹⁶

Para este caso, se utilizará como fuerza aplicada el valor medido directamente por la máquina de ensayos. Dependiendo de la tensión que se vaya a calcular se utilizará una sección inicial u otra.

Alargamiento o Deformación Unitaria

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

e = Alargamiento o Deformación Unitaria

L_0 = Longitud Inicial de la Probeta

L = Longitud de la Probeta en un Momento determinado.

Ilustración 53: Formula de deformación unitaria¹⁶

En nuestro caso, el incremento de longitud ($L-L_0$), es directamente el valor medido por el extensometro, y el L_0 es el valor de la distancia entre las pletinas más 20mm. Los 20mm son por los dos imanes de diámetro 20mm.

Este factor, a la hora de ser representado, será como un %, por lo tanto, irá multiplicado por 100.

Con los dos factores anteriores calculados, se realizarán dos gráficos. Un gráfico contiene dos líneas, la progresión de tensión – deformación calculado con la sección del mortero, y con la de la malla. El otro, es otro gráfico de tensión – deformación , pero esta vez, con la tensión de adherencia de la malla al mortero.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

Ilustración 54: Formula del modulo de Young

Como ya se ha dicho anteriormente, los cálculos de este factor (modulo de Young) han de ser en una zona lineal y con pendiente positivo.

■ Ejemplo:

Se abrirá en una hoja de calculo el documento del tipo .txt que recoge la máquina para poder realizar los cálculos de manera sencilla, dado que son muchos los datos que esta recopila. A este, se añadirá la columna de con la L_0 (Lin en la siguiente imagen).

	A	B	C	D
1				
2	Test Method	MTS Tracció-TRM.msm		
3	Sample I. D.	SC-5.mss		
4	Specimen Number	1		
5				
6	Load (N)	Crosshead (mm)	Extensometer (mm)	Lin (mm)
7				
8	5	0	0	221

Ilustración 55: Datos iniciales

Una vez lo tengamos, realizaremos los cálculos de elongación, y los de tensión para los tres casos. Para ello se han calculado previamente las secciones. Finalmente tendremos las siguientes columnas:

Elongación (%)	Area Mortero	Tensión Mortero	Area Malla	Tensión Malla	Area Adh	Tensión Adh
0	500	0,01	28,26	0,176928521	8694	0,000575109

Ilustración 56: Datos calculados

Como se puede observar los resultados tienen por nombre SC5-1, esto quiere decir que estos resultados corresponden a la probeta fabricada con algodón, espacio central de 5cm y corresponde con el primer espécimen ensayado de esa tipología.

Con estos cálculos, realizaremos dos gráficos, uno contendrá la tensión del mortero y de la malla frente a la elongación, y el otro la tensión de adherencia frente a la elongación. Estos gráficos tienen la siguiente forma:

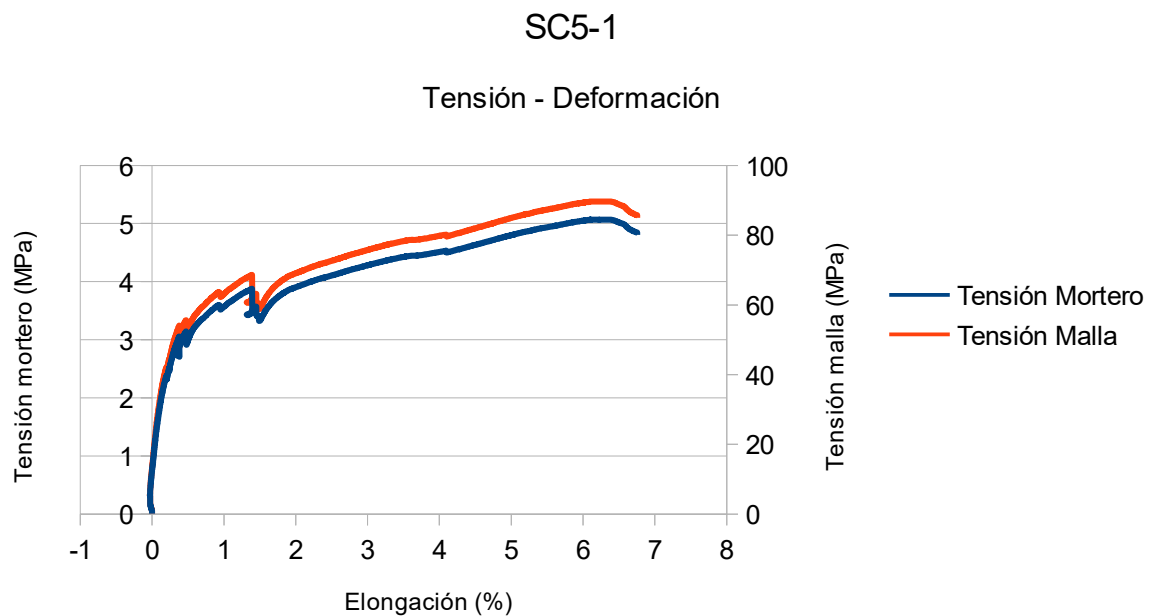


Ilustración 57: Gráfico Tensión Deformación SC5-1

SC5-1

Tensión - Deformación Adherencia

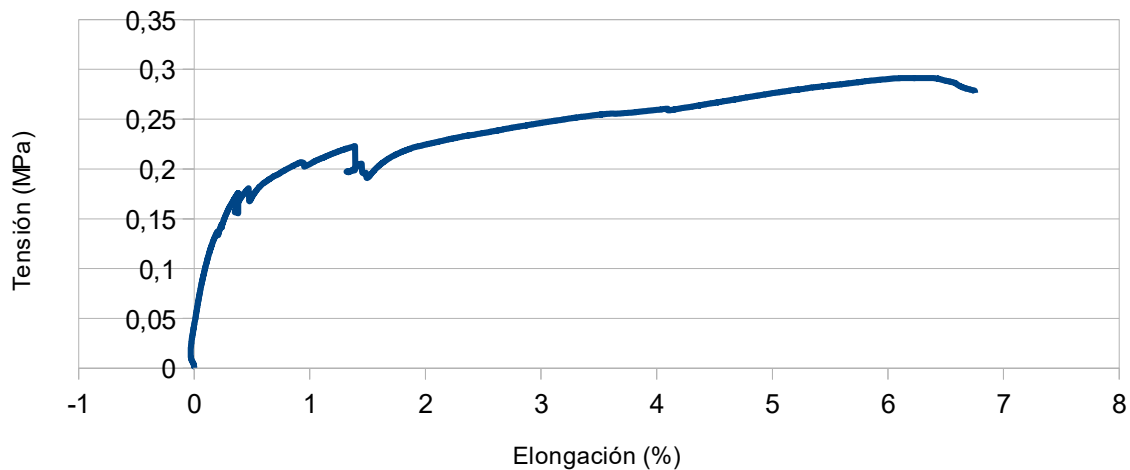


Ilustración 58: Gráfico Tensión adh - Deformación SC5-1

En estos gráficos se pueden distinguir de manera clara tres zonas, las cuales están marcadas en la siguiente pagina:

- Zona 1: Zona de carga del mortero. En esta zona, es donde se calculará posteriormente el E mortero.
- Zona 2: Zona de fisuración del mortero. Los picos del gráfico en esta zona indican diferentes fisuras, en el primero de ellos, se determinará la tensión de fisuración del mortero.
- Zona 3: Zona de carga de la malla. En esta zona se determinará la E malla y también, la deformación ultima.

SC5-1

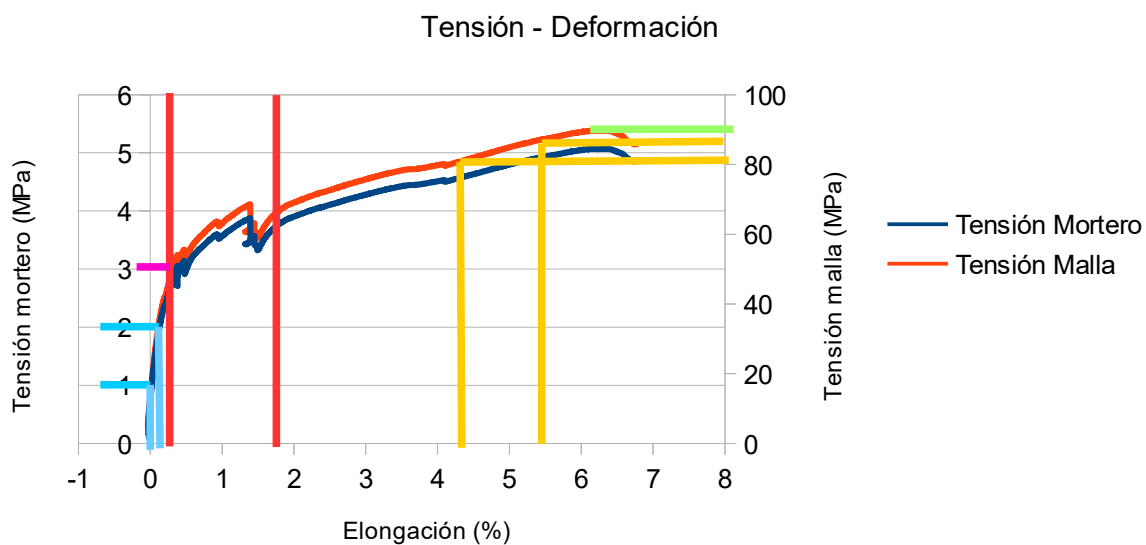


Ilustración 59: Puntos de cálculo en el gráfico Tensión Deformación

También, sobre ese mismo gráfico se calcularán los diferentes puntos anteriormente expuestos:

- **E mortero**: Calculado sobre la línea de color azul oscuro (la que corresponde al mortero).
- **E malla**: Calculado sobre la línea de color naranja (la que corresponde a la malla).
- **Tensión máxima**: Punto máximo de la línea naranja.
- **Tensión de fisuración**: Primera fisura detectada, calculado sobre la línea azul oscuro.

SC5-1

Tensión - Deformación Adherencia

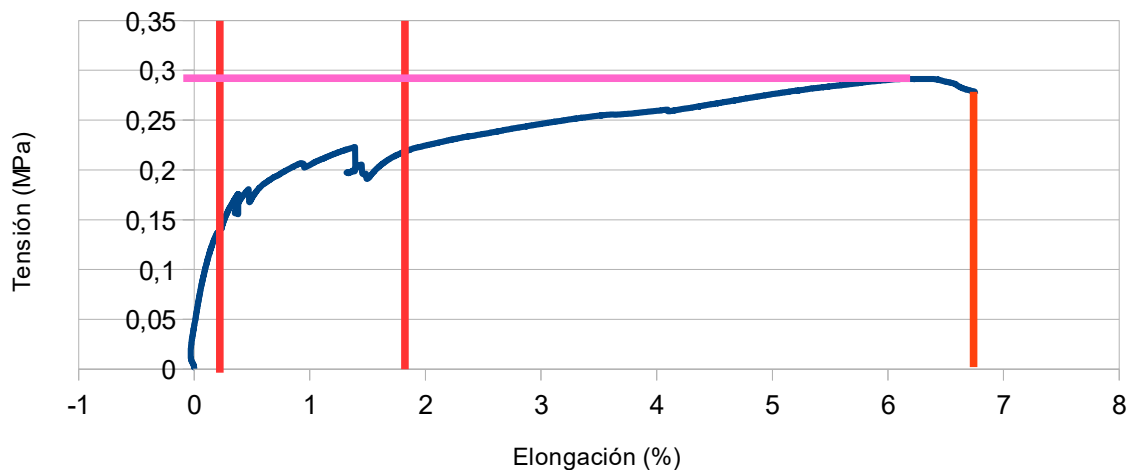


Ilustración 60: Gráfico Tensión adherencia - Deformación SC5-1

Sobre este gráfico se calculará:

- **Tensión de adherencia máxima:** Tensión máxima absoluta.
- **Deformación última:** Deformación máxima, sin que haya dejado de ser útil.

De esta probeta, obtenemos los siguientes resultados:

Probeta	Tensión de fisuración (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Deformación ultima (%)	E mortero (G Pa)	E malla (G Pa)	Tensión máxima de adherencia (MPa)
SC5-1	3,06	89,67	6,76	0,93	0,50	0,29

Tabla 7: Resultados del ejemplo

5.2. Resultados y discusión

A continuación, se presentarán los resultados, ya gestionados y agrupados por tipología de probeta. Se mostrará una tabla con los datos medios medidos en cada caso y un seguido de gráficos de barras para facilitar la comparación visual de los diferentes resultados obtenidos en función de las diferentes variables y factores.

Recordar que todos los cálculos y la tabla completa con todos los resultados está disponible en el *Anexo*.

Probeta	Tensión de fisuración (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Deformación última (%)	E mortero (G Pa)	E malla (G Pa)	Tensión máxima de adherencia (MPa)
SH5	3,04	418,84	2,03	1,08	16,14	0,54
SH10	3,10	396,74	1,84	0,69	22,25	0,57
SH15	3,33	406,77	1,63	0,50	21,57	0,70
SC5	3,16	94,76	6,66	1,04	0,58	0,31
SC10	2,01	99,04	7,53	0,43	0,61	0,38
SC15	2,39	99,78	8,09	0,29	0,63	0,45
SF5	4,41	380,52	1,94	0,65	24,39	0,49
SF10	3,01	387,90	1,36	0,68	29,37	0,58
SF15	4,51	655,89	2,15	0,45	29,60	0,98
SS5	2,23	102,38	3,42	1,12	2,14	0,41
SS10	2,47	99,90	2,91	0,93	2,89	0,47
SS15	3,18	100,65	3,25	0,81	2,59	0,57

Tabla 8: Tabla de resultados (medias)

En la tabla anterior, se puede apreciar los valores medios obtenidos y calculados a partir de los ensayos. En el *Anexo*, hay disponible una tabla igual, pero con los valores de todas las probetas, y todos los valores, e indicados aquellos que no se hayan utilizado para estas medias por las diferentes razones allí explicadas.

En cuanto a los valores dispuestos en la anterior tabla, podemos apreciar:

- **No se aprecia ningún tipo de relación entre la tensión de fisuración del mortero y la tipología de la malla o su longitud de anclaje.**

En cuanto a esto, se puede admitir que la tensión de fisuración del mortero se encuentra entre 2MPa y 4,5MPa. Este es un valor que depende en gran parte en la fabricación del mismo.

■ Tensión máxima y módulo elástico de la malla:

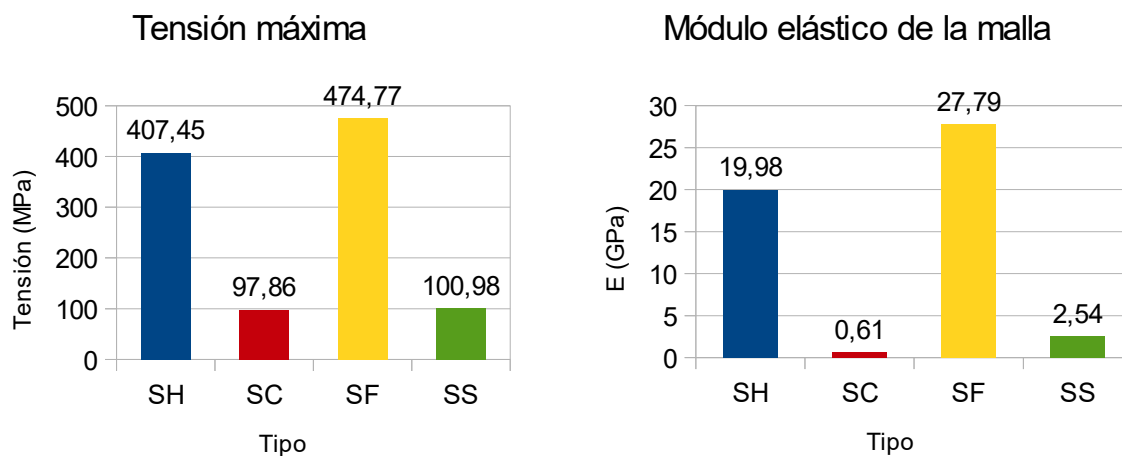


Ilustración 61: Gráfico de la tensión máxima

Ilustración 62: Gráfico del módulo elástico de la malla

Si comparamos estos dos gráficos podemos ver que guardan una relación directa. Podemos afirmar que la tensión máxima determinada en los ensayos, está directamente relacionada con el módulo elástico de la malla que compone el espécimen, siendo este módulo, un parámetro propio de cada malla. Esto es así debido al tipo de ensayo y se puede confirmar que realmente se ha ensayado la malla frente al mortero.

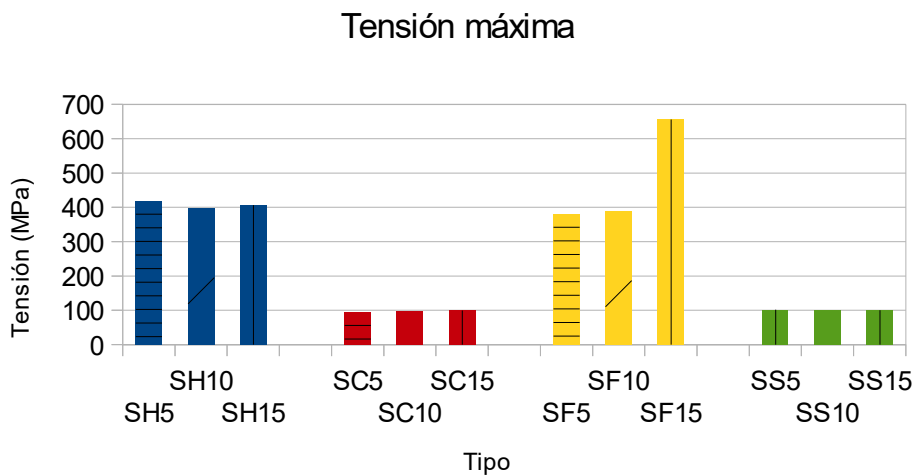


Ilustración 63: Gráfico de la tensión máxima en función de la LA

Módulo elástico de la malla

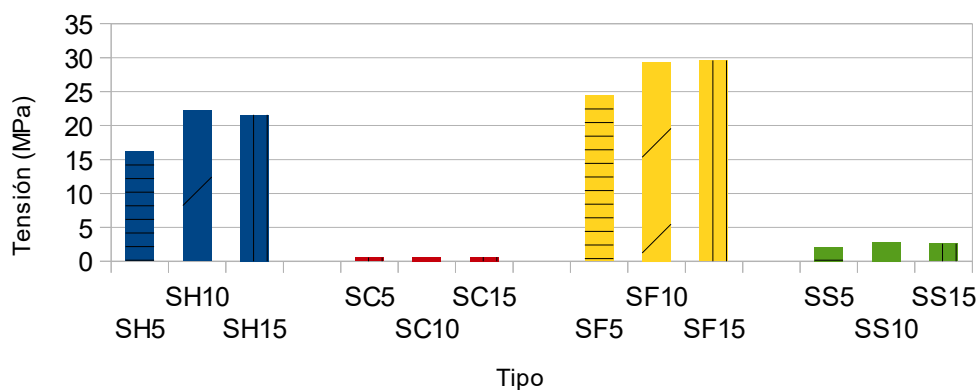


Ilustración 64: Gráfico del módulo elástico de la malla en función de la LA

Como se puede apreciar en los dos gráficos anteriores, ni la tensión máxima ni el módulo elástico guardan, aparentemente, relación alguna con la longitud de anclaje. En el gráfico de la ilustración 63 se puede ver un sobre pico en la tensión de los especímenes de SF15, esto es debido a que los tres dieron resultados adversos e incomparables, y se escogió el resultado mayor dado que el tipo de fallo fue por rotura de la malla.

■ Deformación:

Deformación

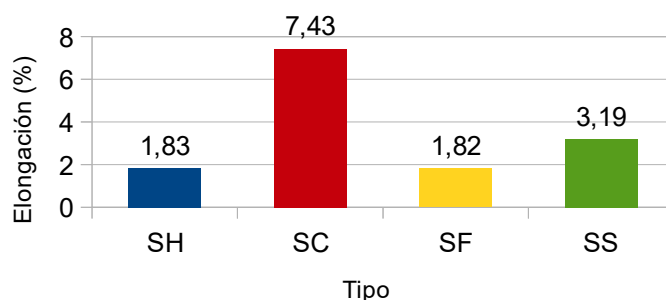


Ilustración 65: Gráfico de deformación

En este gráfico se puede apreciar la deformación media de los especímenes en tanto %. Podemos apreciar que las probetas de algodón son las que más han deformado, más de un 4% que el resto. Esto viene dado por el tipo de hilo utilizado. En caso del algodón, se utilizó un hilo trenzado, pero en el cual existía gran facilidad de deshilar el hilo (con poco que se retorció el hilo, los cabos que lo componen quedaban sueltos), esto hace, que el algodón tenga mucha adaptabilidad, y por lo tanto, que acabe deformando tanto. En caso del lino (F) y el cáñamo (H), estos hilos eran más difícil de deshilar y se notaban más tensos (no se doblaban con tanta facilidad como el algodón), lo que hace que necesite de menos fuerza a tracción para llegar a la tensión máxima.

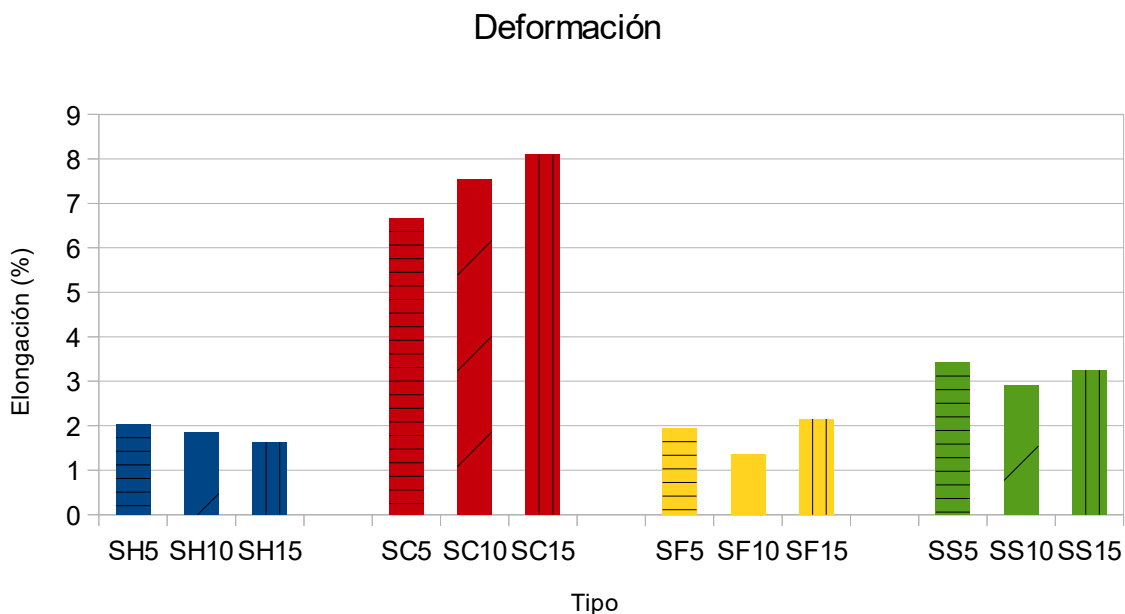


Ilustración 66: Gráfico de la deformación en función de la LA

En este gráfico no se aprecia relación aparente entre la deformación de la malla en contraposición de la longitud de anclaje.

■ **Módulo elástico del mortero:**

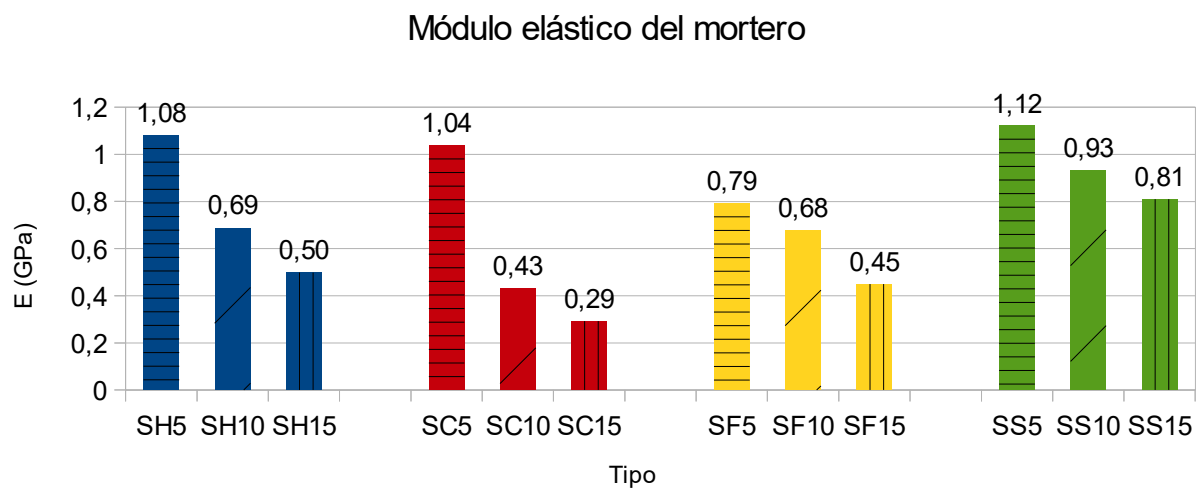


Ilustración 67: Gráfico del módulo elástico del mortero

En el gráfico anterior se puede apreciar el módulo elástico del mortero, el cual depende solamente del propio mortero y de la longitud de anclaje. Se puede apreciar como a menor longitud de anclaje, menor es el módulo elástico obtenido en los ensayos. Esto es debido a que en longitudes de anclaje mayores, hay mayor cantidad de mortero, y por tanto, la rigidez mayor del mortero se impone sobre la aportación menos rígida de las mallas vegetales

■ Tensión de adherencia

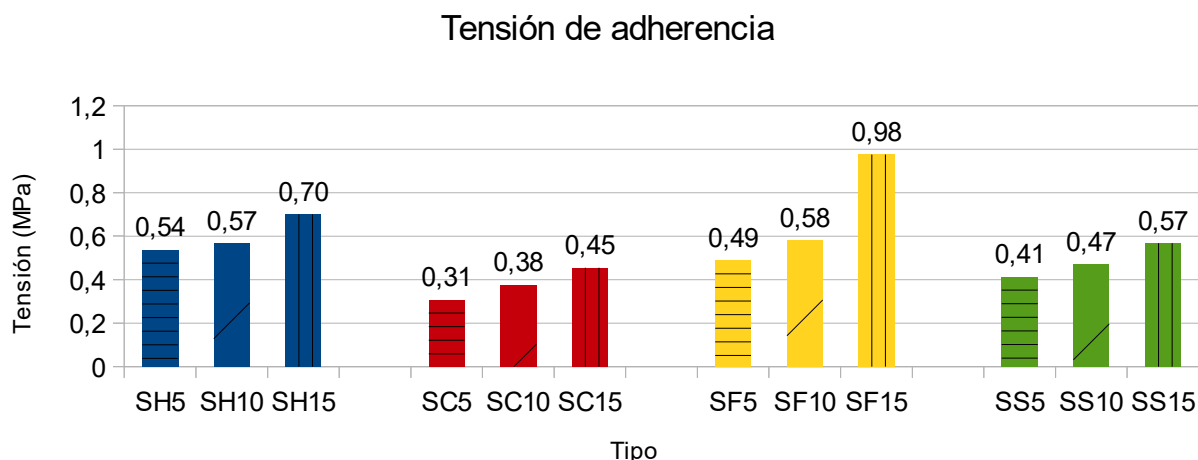


Ilustración 68: Gráfico de tensión de adherencia

En este gráfico se puede ver la influencia de la longitud de anclaje con respecto a la tensión de adherencia. En general, todas las probetas han aguantado unas tracciones semejantes, así que lo que crea esta variación es el área de adherencia, el cual disminuye en disminuir la longitud de anclaje. Por tanto, las diferentes longitudes de anclaje no muestran ninguna influencia sobre la tensión de ruptura. Este dato quiere decir que con una longitud de adherencia de 12,5cm ya tendríamos suficiente para la aplicabilidad del material. Esta conclusión hace que se pueda ahorrar bastante material por el hecho de que actualmente se recomiendan adherencias de 20cm o más

■ Tipologías de fallo:

Algo que aun no se ha mencionado es el tipo de fallo de las probetas en estos ensayos. A continuación se mostrará una tabla con el número total de especímenes que rompen de diferentes maneras según el tipo de malla.

Tipo	Rotura malla	Apertura pletinas
SH	1	8
SC	7	2
SF	1	8
SS	9	0

Tabla 9: Tipos de rotura

En la tabla anterior, podemos observar dos tipos de fallo después de haber realizado todos los ensayos. **Añadir que en todas las probetas ha aparecido multi-fisura.** Este fenómeno indica que la adhesión entre los diferentes componentes del FRCM es mayor que la tensión de fisuración del mortero, dado que la malla carga el mortero, y es este el que acaba cediendo en forma de fisura. La apertura de las pletinas, también indica una buena adherencia, sucede a altas tracciones, e indica la imposibilidad de deslizamiento de la malla dentro de la matriz de mortero. Finalmente, la rotura de la malla, en su totalidad (los cuatro mechones que la componen) indica que la adherencia entre el mortero y la fibra es la optima y suficiente, para su utilización.

En el caso de las probetas del tipo SH (cáñamo) y SF (lino), el fallo producido es, casi en su totalidad, por la apertura de las pletinas. Esto es debido a la alto módulo elástico que tienen estos dos tipos de mallas. También, influye que sean mallas muy pequeñas, esto les da una menor superficie de contacto con el mortero. En los dos casos en los que el fallo del ensayo ha sido por rotura de las fibras ha sido porque o la probeta estaba desalineada, o que, a la hora de poner la malla en la matriz de mortero, esta no se ha colocado de manera que quedase totalmente recta, y se han tensado más unos mechones que otros.



Ilustración 69: Rotura SH5-1 Ilustración 70: Rotura SF5-3

En el caso del algodón (SC) en todas las probetas excepto dos, el fallo producido es el de la rotura de la malla. Esto es debido a la baja resistencia a tracción que tienen estas fibras. El fallo producido en las otras dos probetas, puede ser provocado por una mala fabricación de la propia probeta. Un mala colocación de la malla en la matriz de mortero en cuanto a la profundidad de la misma, hace que uno de los lados sea más débil que otro, y por consiguiente, acabe separando el mortero.



Ilustración 71: Rotura SC5

En el caso del sisal (SS), tenemos que el tipo de fallo de los ensayos es por apertura de las pletinas. Esto se debe a que la malla es una malla muy gruesa, lo que hace que haya poca cantidad de mortero recubriéndola, y dificulta la correcta colocación de esta en el molde. Por lo tanto, es sencillo hacer que con la tensión, se fisuren los laterales de la probeta y se acaben abriendo.



Ilustración 72: Rotura SS5

6. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la adhesión de los compuestos del tipo FRCM teniendo en cuenta la longitud de anclaje y el tipo de fibra de refuerzo con el que estaba reforzado el mortero, siendo este de naturaleza vegetal. Después de haber ensayado un total de 36 probetas, tres por cada longitud de anclaje y fibra, haber gestionado los datos y expuesto sus resultados, se puede concluir que:

- ◆ Las mallas de algodón se adaptan de mejor manera que las demás mallas. Esto es debido a su bajo módulo de Young. También, el tipo de fallo principal que estos especímenes han sufrido, es el que indica una optima adherencia entre los compuestos que forman el FRCM.
- ◆ Las mallas de lino, cáñamo y sisal, tienen un tipo de fallo de apertura de las pletinas. Esto no indica mala adherencia, ni incompatibilidad de materiales, pero se tendría que probar con otro tipo de ensayo o geometría de probeta, si realmente se quiere evaluar si falla antes la malla a tracción o la adherencia malla-mortero.
- ◆ En las mallas de sisal, se ha comprobado que existe una buena adherencia, pero el grosor de la malla es un parámetro que influye de una manera bastante notable. Sería conveniente, para la ampliación de conclusiones, realizar el estudio con un hilo de sisal mas fino.
- ◆ Las mallas de lino y cáñamo son las que mayor tensión aguantan. Esto es debido a que son las que tienen un mayor módulo de Young, y por ello, también son las que menor desplazamiento sufren en la aplicación de la fuerza.
- ◆ Las diferencias entre los distintos tipos de mallas son claramente visibles, siendo las mallas de lino y cáñamo las que mayor tensión aguantan, y las de algodón las que menos.
- ◆ Aparentemente, la tensión de fisuración del mortero, no tiene nada que ver con el tipo de malla, ni con la longitud de anclaje de esta.
- ◆ Se ha encontrado una relación directa entre el módulo de Young del mortero y la longitud de anclaje, que hace que disminuya el módulo de Young si disminuye la longitud de anclaje.

Finalmente, como continuación de este estudio, se propone realizar un estudio semejante a este, cambiando un parámetro. El parámetro que se propone cambiar es que las pletinas cubran toda la zona de longitud de anclaje. Este cambio podría hacer variar ciertos parámetros encontrados, y a la hora de ensayar los especímenes creados, no se tendría en cuenta la fisuración del mortero, dado que no habría mortero libre que pudiese fisurar.

7. Análisis de seguridad y salud

En este apartado se realizará un análisis de seguridad y salud del laboratorio en el cual ha tenido lugar el desarrollo de la investigación y de los diferentes trabajos que allí se realizan.

En primer lugar, el laboratorio dispone de todo lo necesario para el desarrollo de la investigación de este trabajo de manera segura. Se ha hecho uso de los EPI necesarios en su debido momento.

Los EPI utilizados han sido:

- **Botas de protección:** para la realización de portes y transportes de materiales de peso medio o elevado, y para el uso de materiales con riesgo de daños por caídas medias. Estas son necesarias para la protección de los pies.
- **Guantes mecánicos:** para el uso de cualquier tipo de herramienta, manual o mecánica, en cualquier ámbito, ya sea un martillo o un destornillador, hasta el uso de una mezcladora eléctrica. Estos sirven para proteger las manos de todo tipo de arañazos y enganchadas.
- **Guantes químicos:** para el uso de cualquier sustancia química. Sirven para proteger las manos de posibles sustancias las cuales puedan dañar la piel.
- **Gafas de protección:** para el uso de cualquier producto químico y para el uso de cualquier herramienta de corte o pulido que produzca residuo el cual pueda salir despedido. Sirven para proteger los ojos de cualquier sustancia que pueda caer dentro por descuidos y/o de cualquier resto que salga despedido de cualquier tipo de herramienta.
- **Mascarilla:** para tapar las vías respiratorias y la boca. Sirve para proteger al cuerpo del uso de sustancias químicas, evitando así, que los gases producidos por estas, se introduzcan en el interior del cuerpo por las vías respiratorias y puedan afectar de un modo u otro al organismo.
- **Bata:** para tapar los brazos y torso. Junto a la bata, también se evitará el uso de ropa suelta, e evitará trabajar con el pelo no recogido y se llevarán siempre pantalones largos. Sirve para proteger toda la piel del cuerpo de posibles contactos con sustancias peligrosas.

Una crítica del trabajo es la dificultad habida a la hora de pulir las probetas de manera manual. Estas podrían haber sido pulidas mediante medios mecánicos, con una mola disponible en el laboratorio, pero por recomendaciones del técnico de laboratorio y de Luis Mercedes, se valoraron los problemas que el proceso de pulido podía suponer, y se acabó decidiendo que se harían de manera manual. Los problemas que pueden darse son la generación de polvo de mortero, el que se puedan dañar las probetas o el que se pueda pasar de pulido. Las probetas no necesitan de un gran pulido, pero con unos papeles y una lima, se tarda demasiado en limpiar las probetas, por eso, se recomienda, de cara al próximo trabajo, probar de pulirlas mediante la mola disponible en el laboratorio con calma, tiempo, y saturando la superficie de la probeta de agua, para reducir así la generación de polvo de mortero.

8. Impacto ambiental

En este apartado se va a explicar el impacto ambiental que ha tenido el desarrollo de este estudio, y se va a comparar con el impacto que tiene este tipo de material con otros de la misma naturaleza y con el mismo uso.

Para llevar estas explicaciones a cabo, dividiremos este apartado en:

● Impacto ambiental ligado al desarrollo del estudio:

El mortero supone una gran fuente de contaminación en este trabajo, dado que es el componente que más cantidad se ha utilizado. En este estudio se han utilizado unos 22 kg de mortero aproximadamente, el cual, tiene un impacto ambiental negativo que abarca:

- Las emisiones de partículas a la atmósfera. Esto ocurre durante el transporte, la manipulación y el acopio del mismo, y puede suponer la causa más importante de contaminación.
- Descarga de desechos líquidos. Si el mortero ha sido creado a partir de procesos húmedos, puede suponer una fuente de contaminación para aguas superficiales y freáticas, siempre y cuando este líquido no haya estado bien tratado antes de la descarga.

A todo esto hay que sumarle los diferentes gases de combustión, que surgen de la fabricación del mortero. Estos gases contienen monóxidos y dióxidos de carbono, hidrocarburos, aldehídos, cetonas, y óxidos de azufre y nitrógeno. Esto es así dado que los hornos donde se fabrica se utilizan para destruir una variedad de materiales orgánicos peligrosos¹⁷.

Hay estudios que avalan que la producción de mortero supone un 0,41 kgCO₂/k¹⁸. En total, en este estudio, por parte del mortero se ha liberado algo más de 9kg de CO₂ a la atmósfera.

También, se ha utilizado una cantidad de aproximadamente 1kg de resina epoxi para las mallas, más el adhesivo utilizado para las pletinas, un total de 6 tubos, sumando una cantidad de 1,5kg. En total se han utilizado alrededor de 2,5 kg de resina epoxi.

La mayoría de los epoxis no curados y los agentes de curado son tóxicos o dañinos para los organismos acuáticos y pueden causar efectos adversos a largo plazo en el medio ambiente acuático. También son dañinos para la salud humana, dado que estos pueden causar sensibilización o asma¹⁹. A esto hay que sumarle la contaminación creada en su fabricación, dado que son componentes plásticos derivados del petróleo²⁰.

● Ambientalización:

La investigación y el desarrollo de este tipo de materiales, formados a partir de fibras vegetales, ayuda a reducir el impacto ambiental de manera cualitativa de diferentes maneras:

- Fomenta el cultivo de las diferentes plantaciones necesitadas para la creación de las mallas. Esto, siempre y cuando se lleve a cabo de manera sostenible, ayuda a reducir de manera notable el impacto ambiental en comparación a otros tipos de mallas de origen sintético, o con la fabricación de refuerzos de acero.
- El mortero, al ser reforzado con una malla de origen vegetal, la cual es resistente a la corrosión y a los alcalinos, elimina uno de los problemas de este tipo de compuestos cuando se refuerzan con aceros. Estas propiedades de las mallas vegetales, hace que se permita alargar la vida útil de las estructuras reforzadas, y hace que el impacto que supone su demolición sea menor.



El único punto de este estudio que hace que no sea del todo respetuoso con el medio ambiente, es el que las mallas están impregnadas con resina epoxi, la cual, como se ha visto anteriormente, no es nada respetuosa con el medio ambiente. Por lo cual, se plantea como reto a futuras investigaciones, buscar un recubrimiento que sea más respetuoso, con el que se obtengan unas propiedades semejantes o incluso mejoradas.



9. Bibliografía

- 1 de la Fuente Requena, D. (2016) – *Estudio experimental de las características mecánicas del material compuesto Textile Reinforced-Mortar relacionadas con el tipo de fijación en ensayos a tracción*.
- 2 Rosell Colomer, A. (2016)- *Estudi experimental sobre la relació entre la velocitat d'assaig i les característiques mecàniques del material compost Textile Reinforced-Mortar*.
- 3 Mercedes, L., Gil, L. and Bernat-Maso, E. (2019). *Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites*. [online] ScinceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818309887> [Accessed 10 Mar. 2019].
- 4 ACI Committee 440, ACI 440.2R-08 - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems – (2008).
- 5 Fédération Internationale du Béton, fib-Bulletin 14. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures – (2001).
- 6 National Research Council, CNR-DT 200/2004 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – (2004).
- 7 ACI Committee 549, ACI 549.4R-13 - Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures – (2013).
- 8 Ingegneri.cc. (2019). *FRCM compositi fibrorinforzati a matrice inorganica. Come avviene l'accettazione in cantiere?*. [online] Available at: <https://www.ingegneri.cc/frcm-accettazione-in-cantiere.html> [Accessed 30 May 2019].
- 9 Ombres, L., Iorfida, A., Mazzuca, S. and Verre, S. (2018). *Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118304020> [Accessed 20 May 2019].
- 10 Donnini, J. and Corinaldesi, V. (2017). *Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement*. [online] ScinceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181730702X> [Accessed 20 May 2019].
- 11 de Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenço, P., Oliveira, D., Paolacci, F. and Papanicolaou, C. (2014). *Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry*.
- 12 Ascione, L., de Felice, G. and De Santis, S. (2015). *A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815002115> [Accessed 20 May 2019].
- 13 Ficha técnica Resina MasterBrace P3500 – Assets.master-builders-solutions.basf.com. (2019). [online] Available at: https://assets.master-builders-solutions.basf.com/es-es/mbs_broschuere_masterbrace.pdf [Accessed 15 Mar. 2019].
- 14 Ficha técnica Sika Monotop 612 – Nga.sika.com. (2019). [online] Available at: <https://nga.sika.com/content/dam/dms/ng01/8/ng-np-sika-monotop-612.pdf> [Accessed 15 Mar. 2019].
- 15 Ficha técnica Loctite ES 3425 - Docs-emea.rs-online.com. (2019). [online] Available at: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/02e7/0900766b802e723b.pdf> [Accessed 15 Mar. 2019].
- 16 Areatecnologia.com. (2019). *Ensayo de Traccion. Ensayo, Grafica, Formulas, Problemas.*. [online] Available at: <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html> [Accessed 29 May 2019].

- 17 Es.wikipedia.org. (2019). *Impacto ambiental de la industria del cemento*. [online] Available at: https://es.wikipedia.org/wiki/Impacto_ambiental_de_la_industria_del_cemento [Accessed 30 May 2019].
- 18 Mercader, M., Ramírez de Arellano, A. and Olivares, M. (2012). *Informes de la construcción*. Vol. 64. Nro. 527. Madrid: Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, p.411.
- 19 El Mundo Ecológico. (2019). *¿Cómo afecta el suelo de las industrias al medio ambiente? - El Mundo Ecológico*. [online] Available at: <https://www.elmundoecologico.es/medio-ambiente/como-afecta-suelo-industrias-medio-ambiente/> [Accessed 2 Jun. 2019].
- 20 García, A. (2019). *IMPACTO AMBIENTAL*. [online] Resinas-ipn-esiqie.blogspot.com. Available at: <http://resinas-ipn-esiqie.blogspot.com/2009/06/impacto-ambiental.html> [Accessed 27 May 2019].
- 21 Escrig, C., Gil, L. and Bernat-Maso, E. (2019). *Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817301253> [Accessed 20 Apr. 2019].
- 22 Vila, J. A. (2017) *Influència de la força de pretensat dels teixits en les propietats mecàniques de materials tipus Fabric-Reinforcement Cementitious Matrix (FRCM)*.
- 23 Pertri Bhose, T. (2016) *Experimental Study of the Influence of Pre-Stressing the Mesh on the Mechanical Properties of TRM*.
- 24 R. Ortlepp, S. Ortlepp, M. Curbach, M. di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari, Stress transfer in the bond joint of subsequently applied textile reinforced concrete strengthening, in: 6th Int. RILEM Symp. Fibre Reinf. Concr., 2004: pp. 1483–1494.
- 25 R. Ortlepp, U. Hampel, M. Curbach, (2006) A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening, Cem. Concr. Compos. 28 589–597. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.05.003.
- 26 A. D'Ambrisi, L. Feo, F. Focacci, (2013) Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry, Compos. Part B Eng. 46 15–20. doi:10.1016/j.compositesb.2012.10.018.